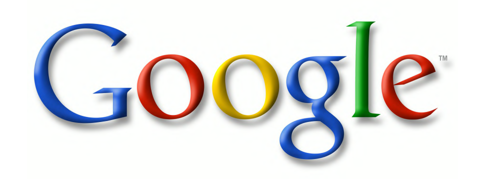

Google



GRANDES VOÛTES

GRANDES VOÛTES

PAR

Paul SÉJOURNÉ

INGÉNIEUR EN CHEF DES PONTS ET CHAUSSÉES
INGÉNIEUR EN CHEF DU SERVICE DE LA CONSTRUCTION
DE LA COMPAGNIE PARIS-LYON-MÉDITERRANEE
PROFESSEUR A L'ÉCOLE NATIONALE DES PONTS ET CHAUSSÉES

TOME VI — APPENDICE

PRATIQUE DES VOÛTES

1RE PARTIE

INSTRUCTIONS POUR PROJETER ET CONSTRUIRE

2ME PARTIE

CALCULS ET ÉPURES

3ME PARTIE

TABLES NUMÉRIQUES

ANNEXES

BOURGES
IMPRIMERIE VVE TARDY-PIGELET ET FILS
15, RUE JOYEUSE, 15

—

1916

POUR RELIER, CONSULTER, CONSERVER L'OUVRAGE, voir p. 283.

APPENDICE

PRATIQUE DES VOÛTES

1[re] PARTIE

INSTRUCTIONS POUR PROJETER ET CONSTRUIRE

2[me] PARTIE

CALCULS ET ÉPURES

3[me] PARTIE

TABLES NUMÉRIQUES

1re PARTIE

INSTRUCTIONS

POUR PROJETER ET CONSTRUIRE

LIVRE I

OUVRAGES DE 8m D'OUVERTURE

ET AU-DESSOUS

LIVRE II

VIADUCS

LIVRE I

OUVRAGES

DE 8^{M} D'OUVERTURE ET AU-DESSOUS

TITRE I

PROJETS D'EXÉCUTION

CHAPITRE I

DÉBOUCHÉS

Art. 1. — Difficulté de fixer les débouchés des petits ouvrages.

Il est fort important, — mais fort difficile, — de déterminer le débouché des petits ouvrages. On a pour eux beaucoup moins de renseignements que pour les grands : les circonstances locales y comptent beaucoup plus.

Il n'y a de sûr que la comparaison avec les ouvrages voisins, reconnus, après examen attentif, suffisants sans exagération d'ouverture. On relèvera donc, avec le plus grand soin, leurs débouchés[1] linéaire et superficiel, leur revanche, leur remous, etc...

Art. 2. — Nécessité de réduire les débouchés à juste ce qu'il faut.

En l'absence de renseignements précis, ou à défaut d'ouvrages voisins, on a généralement exagéré les débouchés des petits ouvrages. Or, ils sont très nombreux : leur coût augmente très vite avec leur ouverture et leur longueur. Il faut donc ne faire pour eux que ce qui est strictement nécessaire.

Pour les petits ponts métalliques, au contraire, on peut augmenter un peu la portée sans bien grande dépense.

Sous la condition essentielle qu'il y ait une revanche suffisante sous la clef ou sous les poutres, un pont trop étroit suffit à débiter les eaux des crues s'il est bien fondé, si les terrassements et les quarts de cône aux abords n'ont rien à craindre, et si la vitesse sous l'ouvrage ne peut pas affouiller le terrain, au cas où il n'y aurait pas de radier.

Un ouvrage sous charge de remblai peut même être aveuglé sans inconvénient sérieux : le remous à l'amont forme une charge qui augmente le débit et compense l'insuffisance du débouché ; mais il faut être absolument sûr des fondations ; il faut que les parafouilles, ou les murs, s'il n'y a pas de radier, soient bien encastrés dans un terrain solide en contre-bas des affouillements possibles.

La revanche sous la clef ou sous les poutres est un élément encore plus important à déterminer que le débouché. Il y a beaucoup d'ouvrages qui sont insuffisants, malgré une ouverture exagérée, parce qu'ils n'ont pas assez de revanche.

Sur des torrents à largeur démesurée, il conviendra souvent de réduire l'ouverture, non seulement par économie, mais pour que les eaux fassent chasse sous l'ouvrage ; avec trop de débouché, le lit s'élève, et un ouvrage d'ouverture exagérée devient insuffisant.

Art. 3. — Méthodes approchées pour fixer les débouchés.

En l'absence d'ouvrages existants voisins, voici différentes méthodes qui permettent une première approximation : elle suffit quelquefois.

1. On reconnaîtra en comparant ces renseignements que, pour beaucoup, les débouchés ont été pris au hasard.

A. — Débouché en fonction du débit du cours d'eau.

On calcule le débit de l'ouvrage à l'aide de la table T_1 (APPENDICE, — 3e partie). On s'assure qu'il est à peu près le même que celui du cours d'eau, lequel s'évalue comme suit :

Lorsque, sur une certaine longueur, le lit est à peu près régulier et qu'on connait bien la hauteur des plus hautes eaux, on lève, en différents points bien choisis, la section et le périmètre mouillés par les hautes eaux, et on calcule le débit à l'aide de la table T_1.

B. — Débouché en fonction de la longueur du cours d'eau.

Pour les petits ouvrages établis sur des cours d'eau qui ne dépassent pas 5 ou 6^{k}, on peut admettre sans bien grande erreur que, dans la même région, les ouvertures sont proportionnelles aux longueurs des cours d'eau. Des ouvrages existants, on déduira facilement le coefficient de proportionnalité [2].

Dans une étude d'avant-projet, et comme première approximation, on pourra sans grande erreur adopter 1^{m} d'ouverture par km. de développement de la branche principale du cours d'eau, soit :

0^{m}60 pour de simples dépressions de moins de 250^{m} [3] ;
0^{m}70 pour des dépressions de 250 à 500^{m} ;
1^{m}00 pour des dépressions de 500^{m} à 1^{km} ;
1^{m}50 pour des dépressions de 1^{km} à 1^{km}500, etc...

On mesure la longueur sur le plan ou sur la carte, ou à défaut au pas.

On augmente le débouché pour les ravins qui charrient ; on le diminue pour les ouvrages sous charge.

C. — Débouché en fonction de la surface du bassin versant.

J'ai fait relever, pour plusieurs centaines d'ouvrages, les ouvertures, bassins, pentes, etc... Il est à peu près impossible d'en dégager une loi, même par régions bien définies. On a toutefois le sentiment, en établissant des graphiques, que, dans la même région et pour de petits bassins, les ouvertures sont proportionnelles à la racine carrée du bassin versant.

Soient : $2a$ l'ouverture en mètres, S la surface du bassin versant en hectares. On peut admettre comme première approximation :

Pour un bassin de:	$2a =$
4 hectares et au-dessous	0^{m}60.
4 à 400 hectares....................................	$0^{m}30 + 0{,}16\sqrt{S}$.
plus de 400 hectares et jusqu'à 30.000	$0{,}17\sqrt{S}$.

Voici, d'après ces formules, les valeurs de $2a$ pour S de 0 à 7.000 hectares :

Surface du bassin en hectares S	Ouverture $2a$	Surface du bassin en hectares S	Ouverture $2a$	Surface du bassin en hectares S	Ouverture $2a$
4^{h}	0^{m} 60	424^{h}	3^{m} 50	1.695^{h}	7^{m} 00
7	0 70	554	4 00	1.946	7 50
19	1 00	701	4 50	2.214	8 00
56	1 50	865	5 00	2.803	9 00
113	2 00	1.047	5 50	3.460	10 00
173	2 50	1.247	6 00	4.982	12 00
285	3 00	1.462	6 50	6.782	14 00

2. En Andalousie, pour les cours d'eau torrentiels (Ramblas), lesquels n'ont d'eau qu'à la suite d'orages, nous admettions de 1 mètre à 1^{m}20 d'ouverture par kilomètre de développement de la branche principale. On avait opéré de même à l'Ouest Algérien.

3. En principe, on place un aqueduc au fond de toutes les dépressions barrées par un remblai. On s'est quelquefois contenté, pour les toutes petites, d'un drain, d'un filtre : c'est une mauvaise pratique.

CHAPITRE II

LEVERS DE DÉTAIL AUX ABORDS DES OUVRAGES

Dans les limites qui intéressent l'ouvrage, on lèvera un plan spécial avec le nombre de cotes convenable.

Les plans levés aux abords des ouvrages doivent être dressés avec le procédé le plus pratique dans chaque cas ; ordinairement, avec une petite ligne de base et des profils en travers sur cette base ; exceptionnellement, dans les terrains difficiles, au tachéomètre.

Ils auront assez de cotes et s'étendront assez loin de chaque côté, surtout à l'amont, pour bien assurer l'entrée et la sortie des eaux, bien placer les têtes, bien orienter l'ouvrage.

C'est sur ces plans spéciaux qu'on lèvera le profil en long de l'ouvrage, puisque c'est sur eux qu'on arrêtera sa direction. Pour les ouvrages à faible pente, spécialement pour ceux d'irrigation, on vérifiera sur le terrain ce profil en long.

Sur le profil en long et sur les profils en travers des cours d'eau, on marquera, si on a pu l'avoir, la ligne des hautes eaux.

CHAPITRE III

HAUTEUR DES PIEDS-DROITS

§ 1. — *OUVRAGES SERVANT EXCLUSIVEMENT A L'ÉCOULEMENT DES EAUX*

Art. 1. — Revanche minima au-dessus des plus hautes eaux.

On règle la hauteur des pieds-droits sur celle des hautes eaux.

La revanche sera déterminée comme suit :

Pour les aqueducs de 0m60 et 0m70 établis sur des dépressions de moins de 500m, une revanche de 0m25 est en général suffisante.

A des ponts sur de grands fleuves, on s'est contenté d'une revanche de moins de 2m00. On peut, sauf dans des cas tout-à-fait exceptionnels, fixer à 1m50 la revanche des ponts de 8m00 en plein cintre.

On fera varier la revanche d'une manière continue de 0m25 à 1m50 comme l'indique ce tableau :

Ouverture	Revanche minima	Ouverture	Revanche minima
0m60	0m25	4m00	1m10
0 70	0 25	5 00	1 20
1 00	0 35	6 00	1 30
2 00	0 60	7 00	1 40
3 00	0 80	8 00	1 50

Pour les voûtes surbaissées, on admettra les mêmes limites, avec cette deuxième condition que les hautes eaux ne dépasseront pas la ligne des naissances.

Il est bien entendu que ces revanches sont des minima, qu'on les augmentera s'il y a lieu, — par exemple, si le cours d'eau entraîne de gros blocs, charrie des arbres, etc., — dans les régions à pluies torrentielles, à sol nu et friable : il faut là, pour prévenir les obstructions, élever sensiblement les pieds-droits des ouvrages.

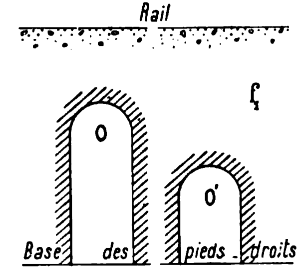
Les Agents qui débutent, cherchent, pour réduire les terrassements, à lécher de trop près le terrain naturel : on empêche ainsi les ouvrages de bien fonctionner, et on expose la plate-forme à être surmontée.

Art. 2. — Hauteur des pieds-droits des ouvrages en plein cintre.

A. — Minima : 0m55.

B. — Maxima : 1m00.

Pour visiter et curer un aqueduc, il faut une ouverture d'au moins 0m60 et, sous clef, une hauteur d'au moins 0m85, soit, pour un aqueduc de 0m60, une hauteur minima de pieds-droits de 0m55. Pour la plus grande ouverture d'un ouvrage courant, 8^m, on ne peut accepter de poser sur le sol la ligne des naissances. J'adopterai la même limite de 0m55.



Soient deux ouvrages O et O' (f_1) de même ouverture, pour lesquels il y a même différence de cotes entre le rail et la base des pieds-droits ; O, plus haut et plus court, est (y compris murs en aile ou en retour) plus cher que O', plus bas et plus long.

Il convient donc de limiter strictement la hauteur des pieds-droits à ce qu'impose la revanche de la clef au-dessus des hautes eaux. Sauf cas très exceptionnels, 1m00 suffit.

C. — Entre les deux limites de 0m55 et 1m00.

Elle sera déterminée dans chaque cas, soit uniquement par la revanche au-dessus des eaux, soit si, bien que l'ouvrage soit fait pour écouler l'eau, on veut permettre — à titre exceptionnel — à un piéton d'y passer en se courbant.

On adoptera, pour chaque ouverture, 3 hauteurs types de pieds-droits : 0m55, 1^m, et une hauteur intermédiaire.

§ 2. — *OUVRAGES SERVANT DE PASSAGE*

Art. 11 du Cahier des charges des grandes Compagnies : « *Lorsque le chemin de fer devra « passer au-dessus d'une route nationale ou départementale, ou d'un chemin vicinal, l'ouverture « du viaduc sera fixée par l'Administration, en tenant compte des circonstances locales ; mais « cette ouverture ne pourra, dans aucun cas, être inférieure à 8^m pour une route nationale, « à 7^m pour la route départementale, à 5^m pour un chemin vicinal de grande communication, « et à 4^m pour un simple chemin vicinal* [4].

« *Pour les viaducs de forme cintrée, la hauteur sous clef, à partir du sol de la route, sera « de 5m00 au moins. Pour ceux qui seront formés de poutres horizontales en bois ou en fer, « la hauteur sous poutre sera de 4m30 au moins...*

« *La hauteur des parapets sera fixée par l'Administration, et ne pourra, dans aucun cas, « être inférieure à 0m80* » [5].

Pour les chemins ruraux, en général peu importants, on pourra réduire l'ouverture des ouvrages à 3^m et la hauteur sous clef à 3m50.

Enfin, dans les acquisitions de terrains, il a pu convenir d'accorder aux propriétaires des passages particuliers pour piétons et bestiaux, de 1m00 à 2m50 d'ouverture ; on ménagera sous clef des hauteurs variant de 2^m à 2m75.

On ne dépassera pas 3^m pour la hauteur des pieds-droits des ouvrages en plein cintre de 4^m à 8^m.

Les angles des culées des passages inférieurs doivent être en pierre dure. On les protégera contre le choc des roues des véhicules, par des trottoirs avec bordures, ou par des boute-roues.

4. Toutefois, sauf cas exceptionnels, l'ouverture des passages ne sera pas supérieure à la largeur fixée par l'arrêté de classement de la route ou du chemin

5. D'après une décision ministérielle du 31 août 1855, la hauteur des parapets en maçonnerie doit être portée à 1m50 pour les ponts placés à moins de 200^m en avant, et moins de 150^m en arrière du milieu des trottoirs des gares.

CHAPITRE IV

DISPOSITIONS DES OUVRAGES EN PLAN

Art. 1. — Direction, entrée, sortie des eaux.

J'appelle très spécialement l'attention sur la nécessité de bien placer les ouvrages. Il faut que la direction soit bien celle qui convient, et que les têtes soient placées où il faut. Dès qu'il y aura doute ou difficulté, les chefs de section devront faire indiquer devant eux, sur place, avec des jalons, l'emplacement des têtes. On peut relever, dans les lignes construites, quantité d'erreurs d'implantation [6] qui sautent aux yeux, et qu'un chef de section un peu soigneux eût évitées en « présentant » l'ouvrage.

Il faut surtout bien étudier sur place l'entrée des eaux, les bien entonner dans l'ouvrage. Si un fossé latéral amène beaucoup d'eau, on l'infléchira un peu avant d'arriver au cours d'eau.

Éviter en principe de dévier les cours d'eau, surtout les torrents. Si on les modifie, les modifier le moins possible : bien s'assurer qu'il n'y aura ni affouillement, ni dépôt, devant, sous, derrière l'ouvrage.

Une modification de cours d'eau impose souvent d'importants travaux de défense.

Dans certains torrents à large lit, il faut parfois prolonger les murs en aile, évasés par des guideaux en enrochements ou en blocs de béton, pour entonner les eaux sous le pont. Ce sont les courants obliques qui sont les plus dangereux.

Il faut enfin que les eaux sortent facilement, et aussi qu'elles ne ravinent pas les propriétés en aval du chemin de fer.

Art. 2. — Murs en aile ou murs en retour ?

A. — Choix à faire.

Les murs en aile [7] coûtent toujours un peu plus cher que les murs en retour [8], surtout pour les ouvrages à radier, du moins en apparence, quand on fait les métrés comparatifs ; mais les murs en retour comportent des gazonnements, souvent des perrés, qu'on ne peut pas évaluer d'avance.

Dans les ouvrages sur torrents, il faut non seulement défendre le pied des quarts de cône, mais quelquefois empêcher par des guideaux les eaux de se jeter sur les remblais et d'y faire brèche.

Pour les ouvrages sans radier, la différence de dépense est très peu importante ; pour les ouvrages à radier, elle peut être négligée pour les portées de 3^{m} et au-dessous.

S'il y a beaucoup à épuiser, s'il faut fonder sur pilotis, le mur en retour ramassé vaut mieux que de longues et étroites fondations de mur en aile.

Sauf ces cas, les murs en aile seront toujours adoptés :

1° pour tous les ouvrages sous charge de remblai, parce qu'ils résistent mieux à la poussée sur les têtes ;

2° pour tous les ouvrages sur cours d'eau, parce qu'ils assurent mieux l'entrée et la sortie des eaux, et qu'ils ne comportent pas d'ouvrages accessoires ; élever dans ce cas la murette de retour un peu au-dessus des hautes eaux ;

3° pour tous les ouvrages sans radier.

En principe, on n'étudiera de murs en retour que pour les passages inférieurs ne rentrant pas dans les catégories précédentes, c'est-à-dire ceux fondés sur radier général et sans surcharge, ceux où le tracé des chemins imposerait des murs en aile trop évasés ou des murettes trop hautes.

6. Par exemple : un ponceau débouchant en face d'une paroi de rocher — ou trop biais sur le lit à chaque tête....

7. Dits quelquefois en prolongement des pieds-droits.

8. Dits quelquefois en prolongement des têtes.

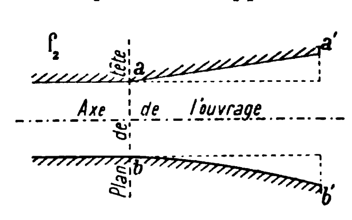
B. — Evasement des murs en aile.

Sauf exception motivée, pour les ouvrages de 0m60 à 1m00, les murs en aile seront établis sans évasement, en prolongement des pieds-droits.

Les ouvrages de plus de 1m seront évasés suivant ce que les lieux demandent (entrée des eaux, raccordement avec les chemins latéraux, etc.).

Quand l'évasement ne sera pas motivé, le supprimer.

On pourra le supprimer à l'aval, tout en l'admettant à l'amont.



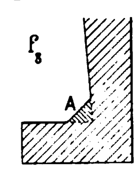
En pratique, l'évasement varie de 1/10 à 1/5.

Les murs en aile (f_2) seront, soit rectilignes (il y aura alors une arête en a), soit suivant une courbe tangente en b aux pieds-droits.

Aux ouvrages de lignes à 1 voie que l'on prévoit devoir être mises à 2 voies, il peut être prudent de ne faire commencer l'évasement qu'au delà de la place de cette seconde voie.

C. — Remblais derrière les murs et murettes de retour.

Faire ces remblais en graviers ou en matériaux non décomposables par l'humidité ou la gelée ; exclure les terres-argileuses, le gypse, etc.



Les murettes de retour s'ouvrent quelquefois en A (f_3) par l'effet du tassement des remblais : ne pas les faire trop longues, et renforcer l'angle rentrant A.

CHAPITRE V

PENTE DES OUVRAGES SUR COURS D'EAU

Sauf ceux pour irrigation qui écoulent des eaux claires et qui sont sur des canaux à faible pente, les ouvrages pour l'écoulement des eaux doivent avoir au moins 0,02 de pente.

Il faut donner aux ouvrages le plus de pente qu'on peut.

Il vaut bien mieux augmenter la pente qui ne coûte rien, que l'ouverture qui coûte cher.

Plus l'ouvrage est petit, plus il est long, plus il faut forcer la pente pour augmenter le débit et prévenir les dépôts.

Un ouvrage peut avoir plusieurs pentes, à condition que la plus petite soit encore suffisante et qu'elles soient bien raccordées.

A la sortie de l'ouvrage, avoir une pente telle que les matériaux entraînés ne s'y déposent pas ; il suffira parfois de creuser un peu plus en aval qu'en amont la dérivation ou le lit.

Bien éviter les réductions de pente à l'amont et sous l'ouvrage par rapport au lit d'amont : elles diminueraient la vitesse et provoqueraient des dépôts.

Un ouvrage bien fondé peut avoir une inclinaison allant jusqu'à 1/1 [9]. Au-delà de 30/100, on rejointoyera au ciment le bas des pieds-droits et le radier ; avec de pareilles pentes, on n'a jamais à débiter beaucoup d'eau.

9. Exemples d'ouvrages en forte pente :

Lignes de :	Ouverture	Pente	Charge de remblai sur la voûte
Rodez à Millau	2m50	0 168	»
Mende à La Bastide	1 00	0 200	0m50
Brioude à Saint-Flour	0 70	0 37	2 90
	1 00	0 335	6 70
Morez à Saint-Claude	0 70	0 58	9 20
	2 00	0 71	3 60
Frasne à Vallorbe	0 70	0 39	1 80
	4 00	0 36	6 40

Sous aucun prétexte, on ne fera d'ouvrages à chutes, sauf quand le rocher en forme naturellement. Les ouvrages à chutes sont très chers, cassent facilement [10].

Dans certains cas exceptionnels, on acceptera un mur de chute, mais seulement à la tête aval, en dehors de la voûte : on protégera le pied de la chute par des dalles ou des enrochements.

Dans les terrains friables à forte pente, on coupera les ravins à l'amont par une série de petits barrages à pierres sèches, comme en fait le Service des Forêts.

Quand la pente dépassera 30 0/0, on retournera horizontalement la tête aval, afin de supprimer les angles aigus du bandeau.

On a quelquefois disposé la tête amont perpendiculairement à la pente : c'est laid.

CHAPITRE VI

DES DIFFÉRENTS TYPES D'OUVRAGES

§ I. — *DALOTS* [11]

Art. 1. — Sous rails.

Bien qu'on en ait fait beaucoup, il faut éviter les dalots sous le chemin de fer, parce que les dalles peuvent casser brusquement [12].

Les dalots sous rails doivent avoir au moins $0^{m}60$, au plus $0^{m}80$ de portée, une hauteur sous dalles d'au moins $0^{m}85$.

On a fait des dalots avec des dalles directement sous ballast, d'autres sous charge de 4 à 5^{m}. Il conviendra de ménager sous ballast un matelas de $0^{m}30$ au moins, $0^{m}40$ si c'est possible.

On acceptera les dalots sous rails à l'entrée des souterrains, quand il s'agira de faire passer un fossé ou les deux fossés de la voie dans l'aqueduc du souterrain. Dans ce cas, la dalle est directement sous le ballast, et la portée est réduite à $0^{m}40$, à $0^{m}50$.

Les dalots sous rails ne seront pas couronnés au niveau du rail, ni même au niveau de la plate-forme ; on appareillera en crossette la dalle de tête, comme pour un ouvrage sous charge.

Art. 2. — Hors la voie.

Pour ceux-là, pas d'ouverture minima ; on pourra descendre à $0^{m}40$ et même $0^{m}50$.

§ 2. — *BUSES*

Art. 1. — Buses en ciment.

A. — Sous rails.

Les buses en ciment ont été souvent employées sous rails [13]. Elles sont trois fois moins chères que les aqueducs de même ouverture.

Comme leurs parois sont plus lisses, à égalité de section et de pente, elles débitent plus. (Voir plus loin la table T_1.)

Elles sont ordinairement moins chères que les dalots ; mais, comme eux, exposées à casser.

Il est prudent de ne les accepter que dans des cas tout à fait exceptionnels, et de préférence pour écouler des eaux claires (irrigations, sources).

Pour éviter des ruptures, on ménagera toujours, entre le dessous du ballast et le dessus de la buse, un matelas aussi épais que possible, jamais moins de $0^{m}50$.

On n'emploiera pas de tuyaux achetés tout faits.

Les buses seront toujours faites, en place, autour d'un moule dont la surface est la douelle de la buse.

10. Il y en a eu beaucoup de cassés entre Millau et Séverac.

11. On a écrit dalots et non dallots, d'après Littré.

12. On pourrait, toutefois, les admettre dans certaines régions où l'on trouve des dalles d'un schiste très résistant et élastique (par exemple à Lourdes).

13. Sous la ligne de Marvejols à Neussargues, il y a 1.023^{m} de buses de $0^{m}70$. J'en ai construit beaucoup : en Espagne, et sous de très grands remblais ; — sous les lignes de Mende à La Bastide, de Brioude à Saint-Flour (42 buses — charge maxima de remblai : 4^{m}). Il n'y a jamais eu d'accidents ni d'inconvénients pour l'écoulement des eaux, même sales, à condition que la buse eût une pente d'au moins 0,02.

On ne tolèrera que très exceptionnellement qu'elles soient faites par tuyaux pilonnés verticalement à côté de l'ouvrage : les joints en seront fermés par un bourrelet en béton (500k de ciment pour 1mc de sable et « graville »).

Le diamètre sera d'au moins 0m60, d'au plus 0m80 : au-delà, il devient difficile de bien faire une buse en ciment non armé.

B. — Hors la voie.

Hors la voie, la rupture d'une buse est plus rare et moins grave. On ménagera un matelas de 0m30 au moins entre le chemin et le dessus de la buse.

Pas de minimum d'ouverture prescrit ; on ne descendra pas toutefois au-dessous de 0m30.

Les buses sous et hors la voie seront enveloppées de terre pilonnée sur 0m30 au moins.

Art. 2. — Buses en fonte pour irrigations.

Pour les eaux d'irrigation, on peut aussi employer des buses en fonte.

Il convient de les établir en déblai sous une certaine charge de plate-forme. Avoir soin de ménager, à l'amont, un petit puisard pour décanter les eaux, et de tenir l'entrée de la buse à 0m15 au-dessus du fond du puisard.

La pente de ces buses peut être abaissée à 0,002.

Elles sont en général plus chères que les buses en ciment de même section : pour leurs joints (à emboîtement et cordon), il faut des ouvriers spéciaux.

On ne les emploiera donc que pour les diamètres inférieurs à 0m30, limite au-dessous de laquelle il n'est pas pratique de faire, sur les chantiers, des buses en béton de ciment.

§ 3. — *CHOIX, POUR LES PETITS OUVRAGES HORS LA VOIE, ENTRE L'OUVRAGE VOÛTÉ, LE DALOT ET LA BUSE.*

En général, l'aqueduc voûté est beaucoup plus cher que le dalot, et celui-ci, un peu plus cher que la buse.

Sauf exceptions motivées, employer le dalot pour les ouvertures de moins de 0m30. Pour celles de 0m30 inclus à 0m80 inclus, employer toujours la buse en ciment ou le dalot : on choisira d'après le prix.

0m80 est la limite d'ouverture des buses en ciment (en ciment non armé).

Pour les dalots, la limite est celle que donnent les matériaux du pays.

On ne dépassera pas en général 0m80, ce qui exige des dalles de 1m10 à 1m20.

S'il s'agit de canaux d'irrigation, préférer toujours en principe la buse en ciment, qui à égalité de section débite plus, ou la buse en fonte pour les diamètres inférieurs à 0m30.

§ 4. — *SIPHONS SOUS RAILS*

On les évitera, parce qu'ils sont difficiles à entretenir, et qu'ils donnent lieu à des difficultés avec les intéressés.

Il ne faut pas non plus en avoir une peur exagérée : ils fonctionnent bien lorsque les eaux sont claires et bien décantées par des puisards.

Les tuyaux de siphons seront en fonte ou en béton de ciment, ou même en maçonnerie, suivant leur ouverture et la charge d'eau.

Quand on a beaucoup d'eau à débiter, il vaut mieux accoler deux tuyaux qu'établir un seul tuyau d'un grand diamètre, parce qu'on a toujours intérêt à réduire la hauteur et que, d'autre part, en cas d'accident ou d'obstruction, il y a chance qu'un tuyau sur deux fonctionne.

§ 5. — *BÂCHES EN TÔLE OU EN BÉTON ARMÉ*

Quand une rigole d'irrigation est coupée à plus de 4m80 au-dessus du rail, on examinera si, au lieu de la faire siphonner, il n'y aurait pas avantage à la faire passer par dessus le rail dans une bâche.

§ 6. — *OUVRAGES SOUS CHARGE DE REMBLAI*

Art. 1. — Les adopter en principe.

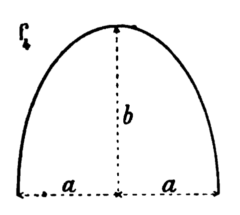
Un ouvrage sous charge coûte toujours moins cher qu'un ouvrage couronné au niveau de la plate-forme [14]. On ne cherchera donc pas à augmenter la hauteur des pieds-droits, sauf pour

14. Voir plus haut p. 10.

ceux sur cours d'eau, quand il y a intérêt à augmenter le débouché, et lorsqu'il y aurait peu à augmenter la hauteur, pour atteindre le niveau de la plate-forme.

Art. 2. — Ouvrages en ellipse surhaussée.

Pour les ouvertures de 2^m et au-dessus, sous charge de remblai de plus de 5^m, on pourra adopter, si l'économie en vaut la peine, des ouvrages en ellipse surhaussée [15].



Il n'y aura que 2 types (f_4) :

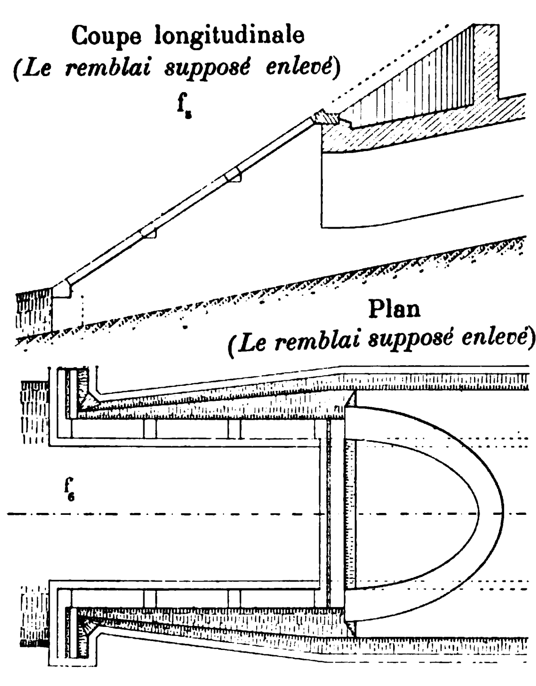
$$b = 1{,}5\ a \qquad \frac{b}{2a} = \frac{3}{4} = 0{,}75 \quad \text{(Type 1).}$$

$$b = 2\ a \qquad \frac{b}{2a} = 1 \quad \text{(Type 2).}$$

Pour la même hauteur sous clef, l'ellipse surhaussée cube moins de maçonnerie que le plein-cintre sur pieds-droits.

On adoptera le type 1, moins cher, quand sa revanche suffira.

Art. 3. — Voûtes à axe vertical reportant sur les murs en aile la poussée du remblai.



Sous un haut remblai, et surtout si l'ouvrage est en très forte pente, on peut craindre que la tête la plus basse se détache du corps.

Pour reporter la poussée sur les murs en aile, on a quelquefois [16] établi, à la tête la plus basse, une voûte à axe vertical en plein cintre; elle serait, plus utilement, en ellipse surhaussée ou en ogive (f_5-f_6).

Ce dispositif ne sera pas appliqué sous charge de remblai de moins de 5^m.

Exemples :

15

Lignes de :	Ouverture	Charge de remblai sur la voûte
Mende à Sévérac	2m 00	25m 00
Linarès à Alméria (Espagne)	3m 00	23m 14
	4m 00	8m 09
	7m 00	9m 85
Mende à La Bastide	2m 00	18m 30
Embranchᵗ de Stravopol (Russie)	1m 60	12m 65
	2m 43	19m 76
Pétrovsk à Bakou (Russie)	6m 40	16m 85
	8m 54	6m 00
Tikhoreskaïa à Tzarytsine (Russie)	1m 92	21m 27
	2m 67	5m 38
	6m 06	34m 20
Langogne au Puy	2m 00	5m 50
	4m 00	10m 00

Renvoi 15 (*suite*).

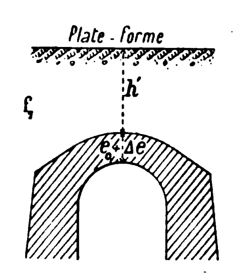
Lignes de :	Ouverture	Charge de remblai sur la voûte
Brioude à Saint-Flour	2m 00	7m 64
	2m 00	9m 65
	2m 50	32m 20
	3m 00	15m 77
	4m 00	13m 03
	5m 00	13m 88
	5m 00	14m 10

16

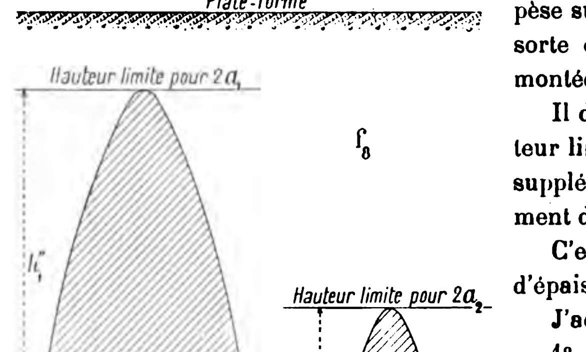
Lignes de :	Ouverture	Pente	Charge de remblai sur la voûte
Rodez à Millau	1m 20	0.148	»
Mende à Sévérac	2m 00	0.075	25m 00
	1m 00	0.167 et 0.20	12m 65
	1m 50	0.20	12m 30
Marvejols à Neussargues	1m 00	0.15 et 0.20	17m 10
	1m 00	0.20	9m 90
	2m 00	0.13	5m 10

Art. 4. — Supplément d'épaisseur des ouvrages sous charge de plus de 3^m de remblai.

A. — A la clef : Δe (f_7).



Les premiers mètres de surcharge pèsent de tout leur poids sur la voûte, mais le remblai des mètres suivants s'arc-boute au-dessus ; ne pèse sur la voûte que la terre comprise dans une sorte d'ogive ou d'ellipse surhaussée (f_8) dont la montée augmente avec l'ouverture de l'ouvrage.



Il doit y avoir, pour chaque ouverture, une hauteur limite de surcharge h'' à partir de laquelle un supplément de remblai ne donne plus de supplément de poussée [17].

C'est ainsi que des souterrains tiennent sous d'épaisses masses en mouvement.

J'admets que Δe doit :

1° — être nul pour des surcharges de 3^m et au-dessous ;

2° — augmenter avec l'ouverture $2a$ et la surcharge h' ;

3° — cesser de croître à partir d'une certaine limite h'' de surcharge, laquelle augmente avec l'ouverture $2a$;

4° — être limité :

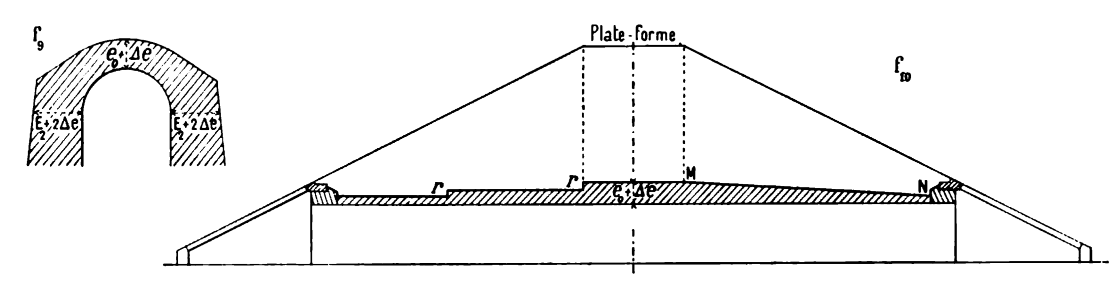
pour la portée de 5^m (souterrain à une voie) : à 0^m25 avec une hauteur limite $h'' = 16^m$.

pour la portée de 8^m (souterrain à 2 voies) : à 0^m36 avec une hauteur limite $h'' = 20^m$.

C'est d'après ces données qu'a été dressé au Titre II, chapitre I, § 1, art. 3, le tableau II des valeurs numériques de Δe.

B. — Aux naissances (f_9).

On a admis 2 Δe.



C — Comment varie l'épaisseur de la voûte, d'une tête à l'autre (f_{10}).

L'épaisseur aux têtes et jusqu'à 3^m de surcharge est e_0. Elle est $e_0 + \Delta e$ sur toute la largeur de la plate-forme.

De chaque tête au bord de la plate-forme, on gagnera le supplément Δe soit par une ligne continue d'extrados M N, soit par des ressauts r (f_{10}).

§ 7. — *OUVRAGES COURONNÉS AU NIVEAU DU RAIL OU AU NIVEAU DE LA PLATE-FORME ?*

Jusqu'à 3^m de portée, l'ouvrage couronné au niveau de la plate-forme coûte moins cher ; de 3^m à 6^m, il coûte plus cher, mais la différence est négligeable. Il a l'avantage de conserver à la plate-forme sa largeur normale ; on le préférera donc jusqu'à 6^m inclus.

17. On a impunément chargé des buses en ciment de hauts remblais, déposé à titre provisoire des remblais sur une file de tonneaux faisant aqueduc...

Pour 7^m et 8^m, bien que les différences soient peu importantes, on fera l'étude comparative.

Il peut y avoir quelquefois intérêt à couronner au niveau du rail les passages inférieurs à murs en retour, lorsque les chemins aux abords tournent très court; on gagne ainsi 0^m65 environ à chaque tête.

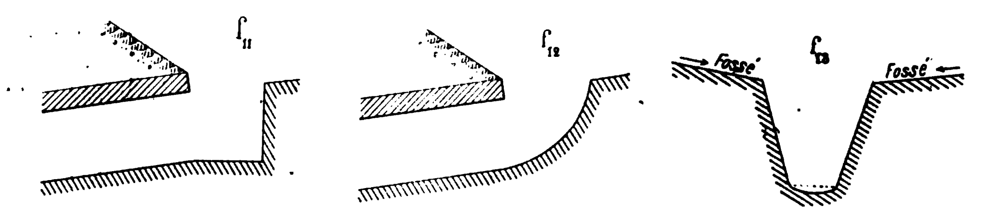
§ 8. — *PUISARDS*

Pour les ouvrages à flanc de coteau, il faut souvent placer un puisard à la tête amont.

L'inconvénient [18] des puisards est qu'ils s'obstruent par les matières entraînées, la neige... : il est particulièrement grave là où, comme dans les Cévennes, tombent de grosses pluies d'orage et où le terrain est très friable.

Pour réduire le danger d'obstruction, il faut :

1° — diminuer, autant que possible, le cube des matières entraînées, en maçonnant les fossés, les descentes d'eau et les parois des puisards, quand la roche n'est pas très solide;



2° — pour que les matières ne séjournent pas dans le puisard, se bien garder, comme on l'a fait souvent fort à tort, d'araser horizontalement le plafond du puisard (f_{11}) : il faut, tout au contraire, lui donner beaucoup de pente, ou le dresser en courbe à très forte pente (f_{12}) ;

3° — pour éviter, en outre, les accumulations d'atterrissements le long des pieds-droits et faciliter le nettoyage du puisard, dresser en fruit ses muraillements (f_{13}) ;

4° — pour que les matières soient facilement entraînées par l'aqueduc, lui donner une très forte pente, 20 0/0 au moins si on le peut.

§ 9. — *OUVRAGES BIAIS* [19]

Art. 1 — Ouvrages couronnés au niveau du rail ou au niveau de la plate-forme.

Il faut éviter les appareils biais.

Sur un cours d'eau tranquille, on peut presque toujours placer l'ouvrage normalement au chemin de fer; les ouvrages droits sont plus courts, leurs têtes plus faciles à appareiller.

On pourra aussi courber en plan les longs ouvrages pour supprimer ou réduire le biais des têtes.

S'il faut accepter un ouvrage biais, on se conformera aux indications suivantes :

1° — Le biais (angle aigu du tracé et des pieds-droits) sera en nombre rond de degrés.

2° — Il n'y aura pas de changement de pente du tracé entre les projections sur lui des points extrêmes de l'ouvrage. Au besoin, on modifierait légèrement son profil en long.

3° — De 90° à 80°, les têtes seront appareillées comme droites.

4° — De 80° à 70°, la douelle sera celle d'une voûte droite. On retournera seulement les voussoirs de tête normalement aux têtes (V, p. 74).

5° — De 70° à 55°, on adoptera l'appareil héliçoïdal pour les arcs surbaissés, l'appareil

18. Il ne faut pas se l'exagérer. Entre Marvejols et Saint-Sauveur de Peyre, sur 34 aqueducs à puisard, au bout de 15 ans (de 1879 à 1894), tous ont été trouvés en bon état, fonctionnant bien, sauf un qui était engorgé, parce qu'il n'était pas revêtu et que la roche était délitée.

19. Voir Tome V, p. 72.

Léveillé [20] pour les pleins cintres et les ellipses ;

6° - Quand le biais sera de moins de 55° [21], on étudiera un tablier à poutrelles enrobées de béton, ou, à défaut, un tablier métallique.

Pour les ouvrages dont la longueur entre têtes sera supérieure à quatre fois l'ouverture biaise, on n'appareillera en biais, à partir de chaque tête, qu'une longueur égale à cette ouverture.

Art. 2. — Ouvrages sous charge.

Pour tous les ouvrages sous charge, les têtes resteront droites, c'est-à-dire perpendiculaires à l'axe de l'ouvrage, sous plinthes rampantes, à condition que le remblai soit assez haut pour que la plinthe ne sorte pas de la plate-forme. (Voir plus loin Titre II, chapitre V).

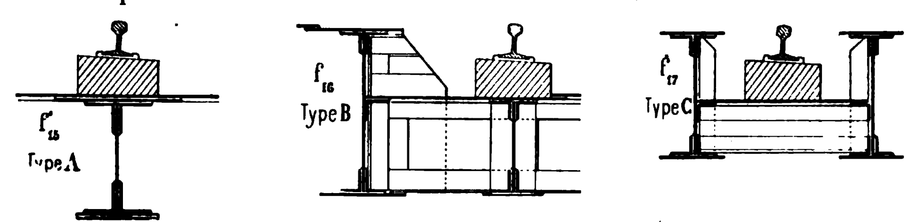
§ 10. — *TABLIERS MÉTALLIQUES, POUTRELLES ENROBÉES.*

Art. 1. — Tabliers métalliques.

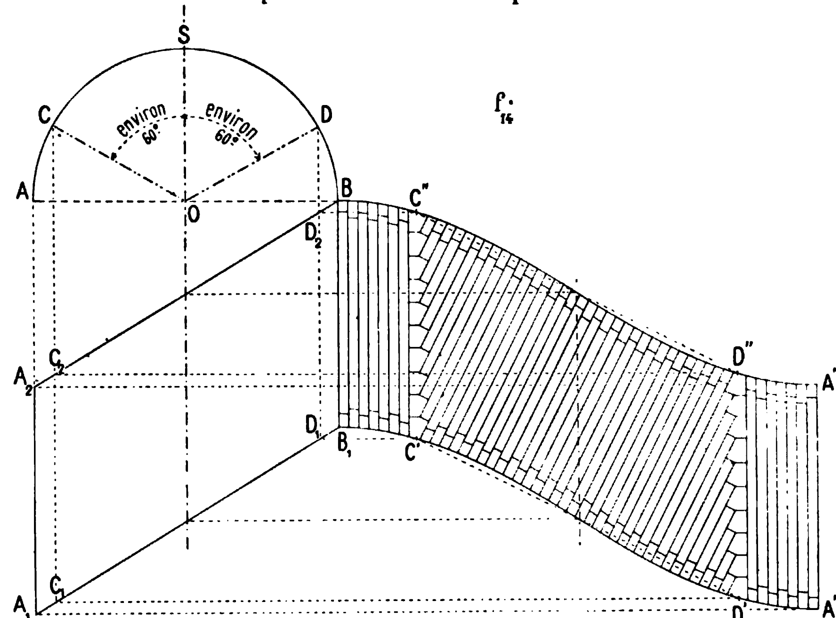
La longrine sous le rail repose : soit directement sur la poutre principale (Type A, f_{15}) ; soit sur un longeron (Type B, f_{16}) ; soit dans une poutre à caisson (Type C, f_{17}).

On choisira suivant l'épaisseur dont on dispose, (l'épaisseur est la distance verticale entre le dessus du rail bas et le point le plus bas du dessous des poutres principales).

Si la hauteur est suffisante, on adoptera le type A plus économique ; si non, — soit le type B, dont les longerons s'inscrivent facilement dans les courbes à petit rayon, — soit le type C, si la hauteur manque.



Pour un pont biais, la portée des poutres sera comptée suivant le biais ; à l'ouverture biaise, on ajoutera la distance à réserver entre les bords des sabots et les parements des culées, laquelle est au moins 0^m10 comptée normalement au parement de la culée.



20. Dans l'appareil Léveillé (f_{14}), les segments de voûte AC et BD, audessous du milieu de la montée, sont traités comme un berceau droit (assises parallèles à la ligne des naissances) ; le cerveau CSD, audessus du milieu de la montée, est en appareil hélicoïdal. Pour CSD, sur la douelle développée, les lignes d'assises sont des droites perpendiculaires aux cordes C'D', C"D" des courbes de tête développées. Pratiquement, l'angle COS = SOD sera pris (près de et un peu audessus de 60°), de façon que tous les voussoirs des têtes aient même largeur en douelle et que le point S tombe au milieu d'un voussoir.

21. A la page 75 du Tome V, on a indiqué 50° comme limite du biais : on l'a élevée ici à 55° pour les ouvrages courants.

Voici les épaisseurs des trois types :

Ouverture droite	Type A		Type B		Type C	
	N° des types	Epaisseur de tablier	N° des types	Epaisseur de tablier	N° des types	Epaisseur de tablier
0^{m} 60	»	»	Au-dessous de 0^{m}70 d'épaisseur, on n'a plus assez de hauteur pour bien fixer les longerons aux entretoises.		»	0^{m} 502
0 70	»	»			»	(si la haut. manque,
1 00	»	»			»	0 401)
1 50	N° 1	0^{m} 600			N° 21	0 502
2 00	2	0 640			22	0 502
3 00	3	0 652			23	0 502
4 00	4	0 740			24	0 504
5 00	5	0 812	N° 13	0^{m} 730	25	0 511
6 00	6	0 900	14	0 735	26	0 526
7 00	7	0 980	15	0 735	27	0 558
8 00	8	1 080	16	0 793	28	0 624

Ces épaisseurs de tablier sont pour le rail de 130^{mm} de hauteur (Vignole de 39^{k}). Elles devront être augmentées de 0^{m}012, pour celui de 142^{mm} de hauteur (Vignole de 48^{k}).

Art. 2. — Tabliers à poutrelles enrobées de béton [22].

Depuis quelques années, on fait couramment des tabliers sous rails avec des poutrelles d'acier en I enrobées de béton de ciment : ciment 300^{k}, sable 400^{l}, gravier ou pierre cassée 800^{l}.

Jusqu'à la portée de 10^{m}, les poutrelles ont les hauteurs que fournissent couramment les forges.

Dans les calculs de résistance, on ne tient compte que des poutrelles.

Les tabliers à poutrelles enrobées ont, sur les métalliques, les avantages suivants :

1° — ils sont très faciles à exécuter ;

2° — on y pose la voie sur ballast et sur traverses, comme en voie courante ;

3° — ils ne demandent pas plus d'entretien que les ouvrages voûtés : l'acier enrobé de béton ne craint plus la rouille.

Si l'épaisseur de l'ouvrage n'est pas strictement limitée, on protégera le dessous des poutrelles, spécialement au-dessus des cours d'eau et des voies de chemins de fer, par un enduit en mortier de ciment : l'épaisseur du tablier est alors augmentée de 0^{m}030.

Voici, pour des ouvertures de 0^{m}60 à 8^{m} en palier, l'épaisseur des divers types d'ouvrages, comptée à partir du dessus du rail bas (0^{m}50 au-dessus de la plate-forme).

Ouverture	Epaisseur entre le dessus du rail bas (0^{m}50 au-dessus de la plate-forme) et le dessous des :			Economie d'épaisseur des tabliers métalliques du type C par rapport :	
	tabliers métalliques (type C)	poutrelles enrobées (non compris la chape inférieure)	clefs des ouvrages voûtés (sans le matelas *m* sur la chape f_{11} - p. 21)	aux ouvrages avec poutrelles enrobées	aux ouvrages voûtés (sans le matelas *m* sur la chape f_{11} - p. 21)
0^{m} 60	0^{m} 401 ou 0^{m} 502	0^{m} 760	0^{m} 90	0^{m} 359 ou 0^{m} 258	0^{m} 499 ou 0^{m} 398
0 70	0 401 ou 0 502	0 760	0 91	0 359 ou 0 258	0^{m} 509 ou 0^{m} 408
1 00	0 401 ou 0 502	0 760	0 94	0 359 ou 0 258	0^{m} 539 ou 0^{m} 438
1 50	0 502	0 780	0 98	0 278	0 478
2 00	0 502	0 800	1 02	0 298	0 518
2 50	0 502	0 820	1 05	0 318	0 548
3 00	0 502	0 850	1 08	0 348	0 578
3 50	0 502	0 880	1 11	0 378	0 608
4 00	0 504	0 910	1 16	0 406	0 656
5 00	0 511	0 970	1 20	0 459	0 689
6 00	0 526	1 030	1 25	0 504	0 724
7 00	0 558	1 090	1 28	0 532	0 722
8 00	0 624	1 150	1 32	0 526	0 696

22. Adoptés dès 1901 par la Cie de l'Est ; aujourd'hui, par l'Etat, l'Orléans, le PLM.

Les épaisseurs des ponts à poutrelles enrobées peuvent légèrement varier s'ils sont en rampe. En palier, ou en rampe de moins de 0,015, on dresse la chape en dos d'âne, à pentes de 0,015, de manière à renvoyer les eaux vers les culées ; en rampe de 0,015 ou plus, la chape a celle de la voie : les eaux vont à la culée basse.

Art. 3. — Choix à faire entre les voûtes, les tabliers à poutrelles enrobées et les tabliers métalliques [23].

Adopter toujours l'ouvrage voûté, lorsqu'il est possible.

Lorsqu'il ne l'est pas (manque de hauteur, biais trop aigu), préférer le tablier à poutrelles enrobées au tablier métallique.

N'accepter le tablier métallique que si on n'a pas la hauteur pour le tablier à poutrelles enrobées.

Sous les tabliers sur cours d'eau, à poutrelles enrobées ou métalliques, les revanches minima sont celles données pour les ouvrages voûtés en plein cintre (p. 9).

§ 11. — *QUELQUES DISPOSITIONS EXCEPTIONNELLES.*

Les ouvrages devront toujours être exactement adaptés, ajustés au terrain.

Ce ne seront pas des ouvrages « de confection » : ils seront faits sur mesure, je veux dire qu'ils doivent être faits pour le terrain et le cours d'eau, et non le terrain ou le cours d'eau pour eux.

Il faudra, dans certains cas, accepter des ouvrages courbes en plan et même courbes en profil.

Dans les ravins à grande pente, il y aura quelquefois avantage à faire déboucher les ouvrages de flanc, en dehors et au-dessus du thalweg. Dans ce cas, si la tête amont est aussi en dehors du thalweg, il faut remblayer à l'amont pour combler l'ancien lit, conduire les eaux au nouveau, les écarter du pied du remblai. Dans l'ancien thalweg, sous le remblai, on disposera un drain à pierres sèches ou un simple filtre pour écouler les eaux d'infiltration.

Les ouvrages ainsi établis en dehors du thalweg doivent être tout entiers en déblai, je veux dire que le lit d'amont, l'ouvrage et le lit d'aval doivent être en déblai.

CHAPITRE VII

CHAPES

Art. 1. — Leur constitution suivant l'ouverture.

Pour les voûtes de moins de 4^{m}, l'extrados sera revêtu d'une chape en mortier de chaux hydraulique, en 2 couches de 0^{m}03 massivées à la savate.

Pour celles de 4^{m} et au-dessus, sur la première chape en chaux de 0^{m}03, on étalera une chape en asphalte de 0^{m}015 (2 couches de 0^{m}0075 — la première en mastic pur additionné de 7 0/0 de son poids de bitume, la seconde avec une 1/2 partie de sable, 1 de mastic pur additionné de 7 0/0 de son poids de bitume), puis on défendra cette chape par une contre-chape en béton maigre de ciment de 0^{m}04.

On barbouillera de 3 couches de coaltar (goudron minéral bouillant et flambé) :

1° — les chapes non asphaltées (ouvrages de moins de 4^{m}) ;

2° — tous les parements cachés des maçonneries.

23. On avait jusqu'à ces derniers temps accepté, pour des ouvertures de 0^{m}70, des aqueducs dits à plancher : rails sur longrines en bois. Sous les charges et les vitesses croissantes, les longrines ne sont plus assez sûres.

Au-dessus de la chape, on ménagera, autant que possible, sous le ballast, une épaisseur de remblai de $0^{m}40$, ce qui porte la hauteur totale entre le dessus du rail et l'extrados de la clef à :

Art. 2. — Matelas entre le dessus de la chape et la plate-forme, pour les ouvrages non surchargés.

Ouvrages de moins de 4^{m} d'ouverture :

$0^{m}06$ (chape) + $0^{m}40$ (matelas) + $0^{m}50$ (ballast = $0^{m}96$.

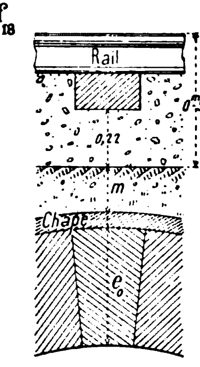
Ouvrages de 4^{m} d'ouverture et au-dessus :

$0^{m}085$ (chapes et contre-chape) + $0^{m}40$ (matelas) + $0^{m}50$ (ballast) = $0^{m}985$.

Mais en appliquant rigoureusement cette prescription, on réduirait beaucoup le nombre des ouvrages voûtés, ce qui serait fort regrettable.

Pour la plupart des ouvrages courants de la ligne de Montauban à Castres, situés dans la plaine du Tarn et de l'Agoût, souvent sur d'autres lignes, on n'a pu adopter la maçonnerie qu'en réduisant sensiblement, voire même en supprimant, le matelas de remblai sous le ballast.

f_{18}

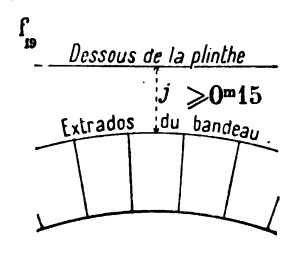


Au-dessous de la traverse portant le rail de 48 kilos, il reste une épaisseur de ballast de $0^{m}22$ (f_{18}) ; avec un matelas *m* réduit à $0^{m}18$, on disposera donc encore d'une épaisseur de $0^{m}40$, bien suffisante pour protéger contre les pinces des poseurs les chapes des ouvrages qui, du reste, ne sont exposées qu'au sommet de la voûte.

A nombre d'ouvrages, il n'y a que $0^{m}65$ entre le dessus du rail et la chape, soit un matelas de $0^{m}15$ sous le ballast.

Il doit donc être entendu que l'épaisseur de $0^{m}40$ pour le matelas est désirable ; qu'un matelas de $0^{m}30$ est encore fort convenable ; qu'on pourra sans très grave inconvénient le réduire à $0^{m}20$, à $0^{m}15$, qu'il pourra encore être réduit, et même à la rigueur supprimé.

f_{19}



Entre le dessous de la plinthe et l'extrados du bandeau [24], il faut (f_{19}) $j \geqslant 0.15$, épaisseur d'un moellon.

Si le matelas *m* (f_{18}) était trop réduit, on n'aurait pas $0^{m}15$: alors on prolongerait la clef et, au besoin, les deux contre-clefs jusque sous la plinthe, soit en continuant les lits du bandeau, soit en les retournant verticalement.

CHAPITRE VIII

COURONNEMENT

§ 1. — *PLINTHES*

Art. 1. — Niveau du dessus.

Pour les ouvrages couronnés au niveau de la plate-forme, la plinthe sera en saillie de $0^{m}05$ sur la plate-forme.

Pour ceux couronnés au niveau du rail, le dessus de chaque plinthe sera toujours de $0^{m}10$ en contre-bas du rail voisin.

Donc, dans les courbes, la plinthe du côté du grand rayon sera surhaussée du dévers par rapport à l'autre.

Dans les pentes, chaque plinthe aura la pente du rail voisin.

Pour les ouvrages sous charge, la plinthe sera en crossette, sans saillie sur le plan du talus.

24. Les dimensions de la plinthe et du bandeau sont données Titre II, Chapitre I.

Art. 2. — Tracé dans les courbes.

En courbe et en raccordement parabolique :

1° — Pour les ouvrages à murs en aile, les plinthes et les têtes seront droites et parallèles à la corde du tracé sur la longueur des plinthes.

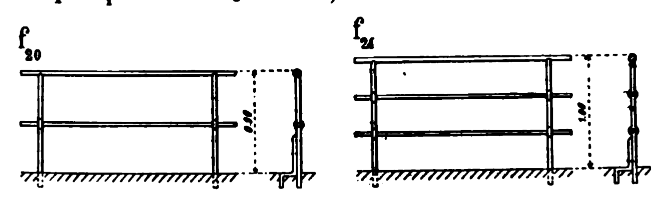
2° — Pour les ouvrages à murs en retour, les plinthes, têtes et murs en retour seront courbes et parallèles à la courbe du tracé.

§ 2. — *GARDE-CORPS*

Art. 1. — Ouvrages sous rails.

Pour tous les ouvrages sous rails, on n'emploiera que des gardes-corps métalliques et non des parapets en maçonnerie, savoir :

A. — Types.

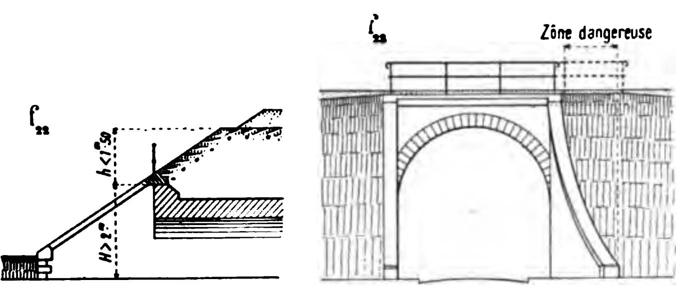


dans tous les ouvrages hors des gares, le type à 2 lisses horizontales (f_{20}), de $0^{m}90$ de hauteur pesant 13^{k} le mètre courant ;

dans les gares et aux abords (à moins de 200^{m} en avant et moins de 150^{m} en arrière du milieu des trottoirs), le garde-corps à trois lisses (f_{21}) de $1^{m}00$ de hauteur pesant 21^{k} le mètre courant.

B. — Sur quels ouvrages ?

On ne mettra de garde-corps que :



1° — sur tous les ouvrages couronnés au niveau du rail ;

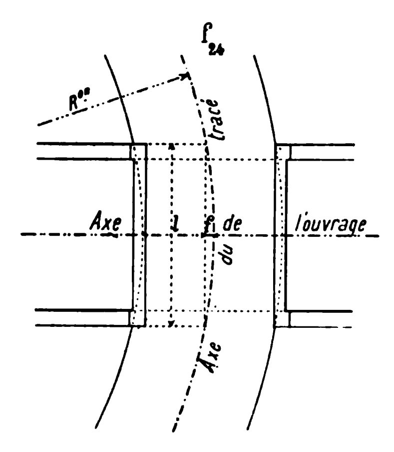
2° — sur ceux de $1^{m}00$ d'ouverture et au-dessus, si le dessous de la plinthe remplit les deux conditions suivantes : (f_{22})

α — être à plus $2^{m}00$ au-dessus du radier ;

β — être au niveau de la plateforme ou à moins de $1^{m}50$ au-dessous.

On prolongera les garde-corps si les abords des ouvrages sont dangereux,[25] ouvrages à murs en aile biais ou courbes (f_{23}).

C. — Distance à l'axe de la voie voisine.



En alignement, la distance de la face intérieure du garde-corps à l'axe de la voie voisine sera de :

$2^{m}90$ pour les ouvrages couronnés au niveau de la plateforme ;

$2^{m}255$ [26] pour les ouvrages couronnés au niveau du rail.

En courbe (f_{24}), pour les ouvrages avec murs en aile, la distance de la face intérieure du garde-corps à l'axe de la voie voisine, mesurée suivant l'axe de l'ouvrage, sera :

25. Une dépêche ministérielle du 15 février 1898 invite la Compagnie P.L.M. à prolonger les garde-corps des ouvrages dangereux.

26. $1^{m}50$ (distance libre à l'axe du rail voisin. — Règlements ministériels sur les ponts métalliques des 29 août 1891, art. 11, et 8 Janvier 1915, art. 27) + $\frac{1^{m}51}{2}$ (demi-voie) = $2^{m}255$.

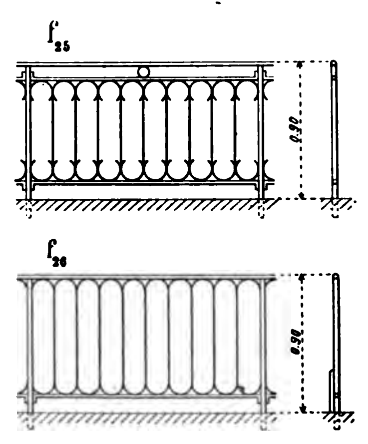
	Du côté du grand rayon	Du côté du petit rayon
Ouvrages couronnés au niveau de la plate-forme...	$2^m90 + \frac{7}{5}$ D[27]	$2^m90 + f$
Ouvrages couronnés au niveau du rail	2^m255	$2^m255 + \frac{3}{5}$ D[28] $+ f$

D est le dévers maximum de la voie ;

$f = \frac{l^2}{8R}$ est la flèche du tracé en courbe de rayon R, sur la longueur l des plinthes, y compris la largeur des rampants.

Pour les ouvrages avec murs en retour, on ne tiendra pas compte de la flèche f.

Art. 2. — Ouvrages hors la voie.



On adoptera :

pour les ouvrages hors des villes, le garde-corps à maillons[29] de 0^m90 de hauteur (f_{25}) pesant 33^k le mètre courant ;

aux abords des villes ou sur les routes très fréquentées, un type (f_{26}) un peu plus robuste pesant 35^k le mètre courant.

Dans certains cas, bien qu'il augmente la largeur entre têtes, on adoptera un parapet en maçonnerie ; il est un peu plus sûr, et ne demande pas d'entretien. On supprimera alors la plinthe : elle n'est pas motivée entre un tympan et un parapet pleins de même aspect.

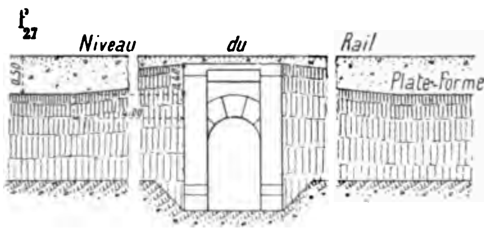
En dressant les projets des ouvrages, on distribuera les panneaux du garde-corps et on appareillera les pierres de taille du couronnement, de manière à ne pas avoir de montants à sceller à moins de 0^m15 des joints.

Les garde-corps métalliques doivent être peints en gris très clair et non en nuance foncée, pour réduire la dilatation, pour mieux voir si le garde-corps commense à s'oxyder.

CHAPITRE IX

ABORDS

Art. 1. — Comment on relève la banquette aux abords des ouvrages couronnés au niveau du rail.



De part et d'autre des abouts des plinthes (f_{27}), la banquette sera relevée de 0^m40 et se raccordera à la plate-forme sur une longueur de 4^m.

Art. 2. — Quarts de cône.

Si l'ouvrage est avec murs en retour, on établira le remblai de façon que les sommets des quarts de cône soient au niveau du dessus de la plinthe et dans le plan du parement du mur. Sans cette précaution souvent négligée, ces ouvrages semblent déchaussés ou mal tracés.

Les quarts de cône non revêtus seront toujours au talus de 3/2.

27. $\frac{7}{5}$ D, pour ne pas rétrécir la largeur de la banquette sur les ouvrages arasés au niveau de la plate-forme du côté extérieur des courbes.

28. $\frac{3}{5}$ D, pour conserver la même distance entre le sommet du garde-corps supposé de 0^m90 de hauteur et les wagons inclinés par le dévers :

$$D \times \frac{0^m90 \text{ (garde-corps)}}{1^m50 \text{ (largeur de la voie)}} = \frac{3}{5} D$$

29. Avec vides d'au plus 14 cm, un enfant qui commence à marcher ne peut pas passer à travers.

On aura soin de les bien défendre : s'ils s'éboulaient, ils pourraient entraîner assez de remblai pour interrompre la circulation.

Art. 3. — Ouvrages hors la voie.

Sauf le cas où leurs terrassements feraient corps avec ceux de la ligne, les ouvrages sous un chemin latéral doivent être bien séparés des ouvrages sous la voie, ceci en vue de la remise aux intéressés.

On réduira autant que possible le nombre des ouvrages à remettre plus tard à des particuliers : passages privés, aqueducs, bâches, siphons pour canaux d'irrigation, etc. La remise et l'entretien ultérieurs donnent fréquemment lieu à des difficultés avec les intéressés : il peut être moins coûteux de les indemniser que de faire l'ouvrage.

Art. 4. — Remblais contre les ouvrages.

A. — Nature des remblais.

On choisira des déblais perméables et qui n'attaquent pas le mortier : des déblais rocheux, du gravier, des pierres cassées ; on excluera l'argile, le gypse...

Quand ce sera trop cher, on entourera l'ouvrage (pieds-droits et voûte) d'une chemise à pierres sèches rangées à la main, de 0^m30 d'épaisseur pour les ouvrages de 2^m et au-dessous, de 0^m40 pour ceux de plus de 2^m.

L'eau filtrant à travers cette chemise est écoulée par une file de barbacanes au bas des pieds-droits ; dans les ouvrages sur cours d'eau, on n'en ménagera pas ; on assurera l'écoulement de l'eau vers les têtes.

B. — Précautions à prendre pour que l'ouvrage ne se déverse pas pendant l'exécution du remblai.

Il faut bien éviter de charger de flanc, d'un seul côté, les ouvrages sous charge, surtout ceux en ellipse surhaussée, surtout ceux avec $b=2a$. (p. 15).

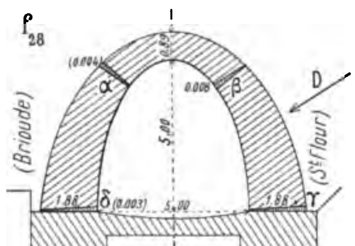
Des ouvrages en plein cintre [30], en ellipse surhaussée [31], ont subi des déversements ou tout au moins des fissures, qu'on aurait dû éviter.

Je rappelle les précautions à prendre pour l'exécution des ouvrages sous charge et des remblais autour d'eux.

1° — Bien encastrer les fondations dans le terrain solide, maçonner à pleine fouille dans le roc.

30. Sur les lignes de Brioude à Alais, La Clayette à Lamure, Paray à La Clayette.

31. Ligne de Brioude à Saint-Flour :



1° — Pont de 5^m (f_{28}) d'ouverture sur le ruisseau de Vendage, sous 20^m de remblai — fondé sur rocher — enveloppé d'une chemise en pierres sèches de 0^m40 d'épaisseur.

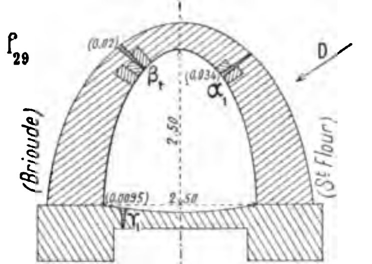
La décharge de côté D y produisit 4 fissures : β (8^{mm}) et δ (3^{mm}) apparentes, α γ seulement décelées par quelques plaquettes de mortier détachées dans les joints.

Fissure δ. — On la refouilla sur 0^m30, et on y bourra, à refus, du mortier pulvérulent de ciment.

Partie de la fissure β. — On enleva la file de moellons au-dessus de β, par longueurs de 1^m50 ; derrière, on ouvrit et on creusa la fissure sur 0^m25 à 0^m30 ; puis on y mata à refus du mortier pulvérulent, on replaça les moellons, on mata les lits.

Reste de la fissure β *et fissures* α et γ. On dégrada les joints sur 0^m20, on perça sur la fissure des trous de $3^{cm}5$ de 2^m en 2^m, de préférence sur un joint, on y engagea de 0^m10 des tuyaux de plomb de 0^m20 par lesquels on injecta, sous pression d'air, un coulis de ciment (50 k. de ciment pour 35 litres d'eau).

On a dépensé 2.017 fr., soit par mètre courant de fissure, 57 fr. 95 pour le matage, 15 fr. 92 pour l'injection : c'est 2,7 °/₀ du coût de l'ouvrage (74.135 fr.).



2° Ponceau de 2^m50 (f_{29}) sur l'Alagnonette, sous 34^m de remblai, enveloppé d'une chemise en pierres sèches de 1^m recouverte d'un matelas de 4^m.

La décharge D y produisit 3 fissures :

α_1 — qui avait 34^{mm} sur 76^m de long ;

γ_1 — fente dans le radier : $9^{mm}5$ sur 66^m.

β_1.

On soutint la voûte par des contre-fiches. Le mouvement s'arrêta quand le remblai atteignit 20^m de haut.

On ficha γ_1 au ciment.

Pour réparer α_1 on enlevait deux files de moellons par longueur de 2^m environ ; derrière, on ouvrait et on creusait la fente, on y matait du mortier pulvérulent, puis on replaçait les moellons et on matait les lits.

Pour réparer β_1 on dut démolir 3 assises ; on remplit ensuite β_1 comme α_1.

On a dépensé 5.583 fr., soit 36 fr. 20 par mètre courant des fissures α_1 et β_1, 12 fr. 20 par mètre courant de la fissure γ_1 : c'est 9,4 °/₀ du coût de l'ouvrage (59.169 fr.).

2° — Pour que l'ouvrage ne soit pas cisaillé, bien éviter toute surface horizontale ; la maçonnerie des pieds-droits y sera très enchevêtrée, très hérissée, faisant bien corps avec le massif de fondation.

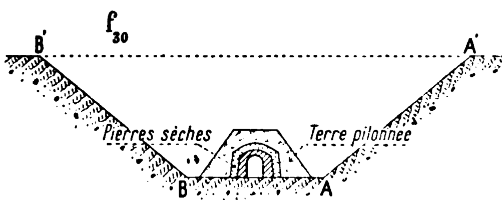
3° — L'envelopper de chemises superposées de pierres sèches appareillées grossièrement en voûte, sur une épaisseur augmentant avec l'ouverture de la voûte et la hauteur du remblai, — réduite vers les têtes.

4° — Entourer le tout d'un épais matelas de terre bien pilonnée, pour résister au déversement de l'ouvrage, pour amortir les chocs des pierres tombant de haut : au moins 2^m sur l'axe de l'ouvrage pour une ouverture de 3^m ; 2^{m}50 à 3^m sur les flancs ; moins aux têtes.

Il faut un fort matelas : consolider ou réparer un ouvrage fendu ou déversé coûterait beaucoup plus que lui.

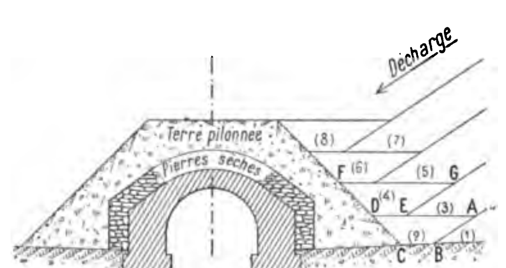
5° — On ne commencera à décharger des remblais poussant contre l'ouvrage qu'après l'achèvement du matelas.

6° — Si on le peut, lorsque la décharge arrivera (f_{30}) en A par exemple, on l'arrêtera.



On traversera l'ouvrage sur une charpente provisoire, et l'on déchargera les terres de l'autre côté jusqu'à atteindre le talus BB', puis on remblaiera l'intervalle AB, A'B' de terres légères, perméables, de gravier... jusqu'à une hauteur au-dessus de l'ouvrage, à spécifier dans chaque cas.

7° — Si on est forcé de décharger les terres d'un seul côté, on devra d'abord étayer par du remblai pilonné le côté opposé à la décharge.

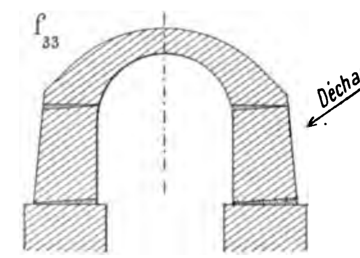


8° — Il ne faut jamais laisser faire la décharge directement contre le talus.

Par exemple, une fois que le talus est arrivé suivant AB (f_{31}), il faut remplir, par du remblai remanié, le trapèze ABCD, puis quand le talus est en GE on remplit de remblai remanié le trapèze GEDF, de façon qu'il y ait toujours du remblai horizontal entre le talus du matelas pilonné et le talus de la décharge.

9° — Lorsqu'un ouvrage est au pied d'un talus naturel assez incliné (f_{32}), il est fort important que de bon gradins retiennent le remblai.

10° — Sous une charge de flanc, les ouvrages se déversent toujours comme l'indique le croquis ci-contre (f_{33}).



Il faut constamment avoir l'œil sur les parties les plus exposées à se fendre.

Le chef de section doit mettre partout des témoins en plâtre ou en ciment, et les suivre tous les jours.

11° — Si, malgré les précautions prises, on aperçoit une fente en un point, il faut immédiatement remettre la voûte sur cintre, et la soutenir par des étais contre la poussée.

Dès qu'on a quelque crainte, ne pas attendre qu'il y ait des fissures : étayer par avance.

MATÉRIAUX

DÉSIGNATION. — ABRÉVIATIONS. — DISTRIBUTION

Désignation des Matériaux	Abréviations à inscrire sur les dessins	Parties des ouvrages où on les emploiera
Maçonnerie de : pierre de taille [1].	**P T**	*Plinthes, tablettes rampantes, crossettes et dés aux abouts des rampants, couronnement des murettes de retour.*
Maçonnerie de : libages.	**L**	*Garde-radiers. — Dés où sont scellés les garde-corps sur les murs en retour d'ouvrages en rase campagne.*
Maçonnerie de : moellons d'appareil.	**M A**	*Encadrement des puisards. — Chaînes d'angle.*
Maçonnerie de : moellons d'appareil employés dans les voûtes (taillés en forme de voussoirs).	**M A V**	*Bandeaux des têtes.*
Maçonnerie de : moellons équarris employés dans les voûtes (taillés en voussoirs).	**M E V**	*Douelle des voûtes sur $0^{m}30$ d'épaisseur moyenne jusqu'aux naissances dans les pleins cintres, jusqu'au milieu de la montée dans les ellipses surhaussées ; cerveau des voûtes de moins de 3^{m} d'ouverture sur toute l'épaisseur.*
Maçonnerie de : moellons ordinaires en parements vus : par assises horizontales. à joints incertains.	**M O H** **M O I**	*Parements vus des pieds-droits, murs en aile, murs en retour, murettes de retour, tympans, puisards, etc..., sur une épaisseur moyenne de $0^{m}25$. Parements vus des radiers sur une épaisseur de $0^{m}20$.*
Maçonnerie de : moellons ordinaires méplats, bien lités, employés dans les voûtes.	**M O V**	*Queutage des voûtes : en plein cintre, au-dessus du milieu de la montée ; en ellipse surhaussée, au-dessus des 3/4 de la montée.*
Maçonnerie de : moellons ordinaires à mortier.	**M O**	*Toutes les maçonneries de moellons à mortier non désignées ci-dessus.*
Béton de chaux.	**B O**	*En fondation, si le béton est plus économique que la maçonnerie* (M O).
Béton de ciment.	**B C**	*Au lieu du béton de chaux, quand ce sera nécessaire. (Fondations dans l'eau, en terrains gypseux, etc...)*
Matériaux rangés à la main derrière les maçonneries.	**P S**	*Chemise derrière les pieds-droits, murs en aile, murs en retour, murettes de retour, etc...*
Dalles.	**D**	*Couverture des dalots.*
Chape de $0^{m}03$ d'épaisseur en mortier de chaux hydraulique.	»	*Sur les voûtes de 4^{m} et au-dessus et sur les glacis des murs de tympans, murs en aile, murs en retour, murettes de retour.*
Chape de $0^{m}06$ d'épaisseur en mortier de chaux hydraulique.	»	*Sur les voûtes de moins de 4^{m} d'ouverture.*
Chape de $0^{m}015$ d'épaisseur en asphalte (2 couches de $0^{m}0075$).	»	*Sur les chapes en mortier de chaux de $0^{m}03$ des voûtes de $4^{m}00$ et au-dessus.*
Contre-chape de $0^{m}04$ d'épaisseur en béton maigre de ciment (100 k de ciment pour 1 m. c. de gravillon sans sable).	»	*Sur les chapes en asphalte.*
Goudronnage à 3 couches de coaltar.	»	*Tous les parements cachés des maçonneries et les chapes en mortier de chaux non recouvertes d'asphalte.*

1. Pour les petits ouvrages, il est en général inutile de boucharder la pierre de taille.

CHAPITRE XI

SONDAGES

1. — Les sondages doivent être faits à côté des fondations, et non à leur emplacement même ; car, comme ils sont d'ordinaire plus profonds qu'elles, il faut alors les remplir de maçonnerie, ce qui est une dépense inutile, et ce qui peut, en outre, dans les terrains qui ne sont pas rigoureusement incompressibles, former sous les maçonneries un point dur, et les faire casser.

2. — J'appelle toute l'attention sur les sondages à l'emplacement des ouvrages. Il en faut assez pour bien définir la nature du terrain sur toute la longueur de l'ouvrage, pour représenter sur la coupe en long, sans grande erreur, par des lignes continues, les séparations des différentes couches ; un sondage unique peut suffire pour un ouvrage court dans un terrain connu ; mais pour des ouvrages longs et en terrain variable, il en faut au moins 3 : 1 au milieu et 1 à chaque tête.

3. — Dans certains cas, on fera une saignée longitudinale suivant l'axe de l'ouvrage.

4. — Quand on trouve du rocher, il faut non seulement s'assurer qu'il règne sous tout l'ouvrage, mais encore vérifier son épaisseur en le perçant à la barre à mine. On peut avoir, en effet, rencontré une dalle peu épaisse ou un bloc isolé.

Il faut toujours savoir ce qu'il y a au-dessous du sol de fondation sur lequel on s'arrête.

CHAPITRE XII

FONDATIONS

Je ne puis évidemment donner ici que des indications très générales.

1° — Il ne faut pas être aussi exigeant pour les fondations d'un ouvrage courant que pour celles d'un grand : il est absurde, comme je l'ai vu faire, de fonder à 14^{m} de profondeur un ouvrage de 2^{m}.

2° — Quand le rocher est trop loin, on peut : soit fonder sur radier, soit descendre sur le rocher des piliers que l'on relie par des voûtes sur lesquelles on établit les pieds-droits, soit encore soutenir le radier par de petits pilotis dont les pointes touchent le terrain ferme. (Exemples, p. 28, 29.)

3° — Pour les petits ouvrages, il n'est pas nécessaire d'avoir un terrain de fondation incompressible : il suffit qu'il soit peu, mais uniformément compressible.

Quelquefois le terrain est moins solide en dessous qu'en dessus ; dans ce cas, se garder de descendre trop bas.

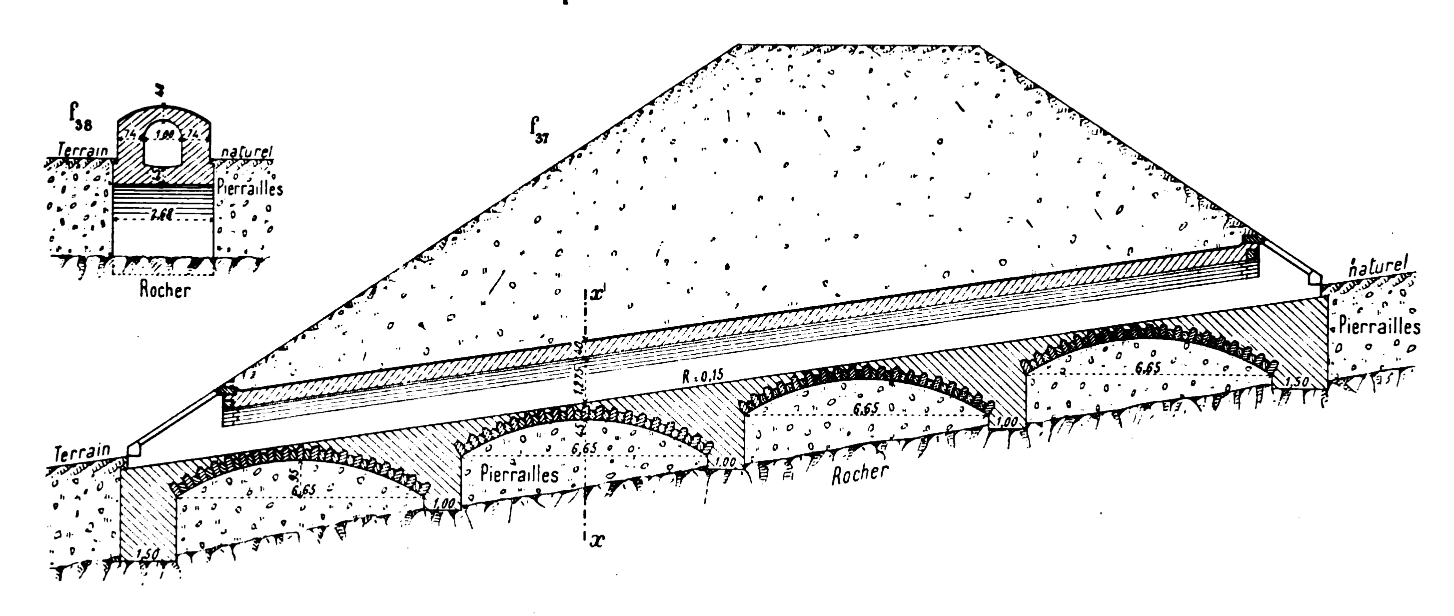
4° — Quelquefois, une partie de l'ouvrage se trouve sur le rocher incompressible, l'autre sur des apports, sur des terrains vaseux, etc... ; dans ce cas, il se cassera au point de passage — c'est sans grand inconvénient. On peut d'ailleurs, par un coup de sabre vertical, ménager d'avance une séparation régulière.

5° — Quand il n'y a aucun danger d'affouillement, on peut, à l'extrême rigueur, fonder les aqueducs hors la voie de 0^{m}60 à 1^{m} sur une couche uniforme de pierres cassées, de gravier ou de sable, arrosée d'un lait de chaux.

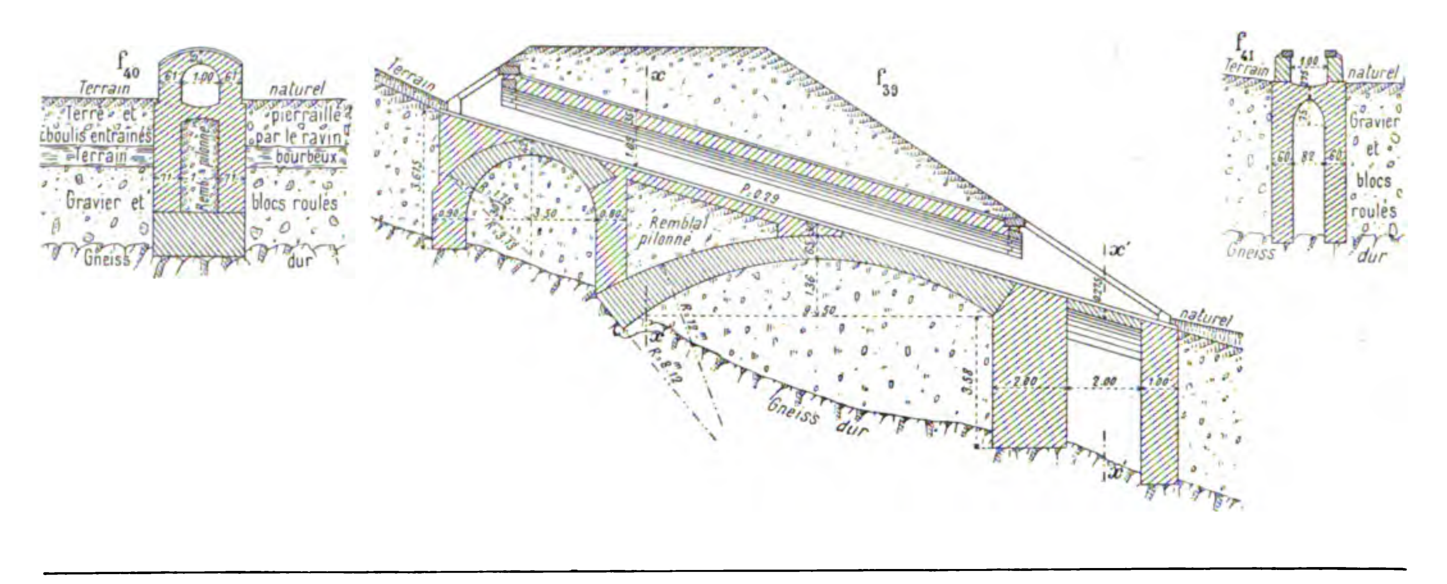
Coupes en long sur l'axe et coupes

LIGNE DE MENDE A LA BASTIDE

Aqueduc voûté de 1m00 d'ouverture

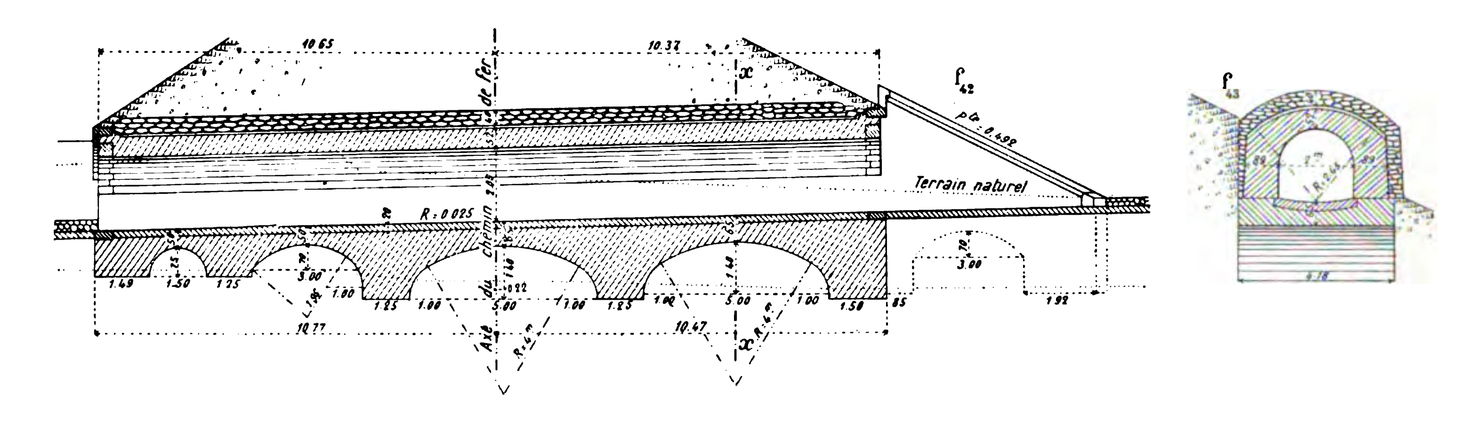


Aqueduc voûté de 1m00 d'ouverture



LIGNE DE BRIOUDE A SAINT-FLOUR

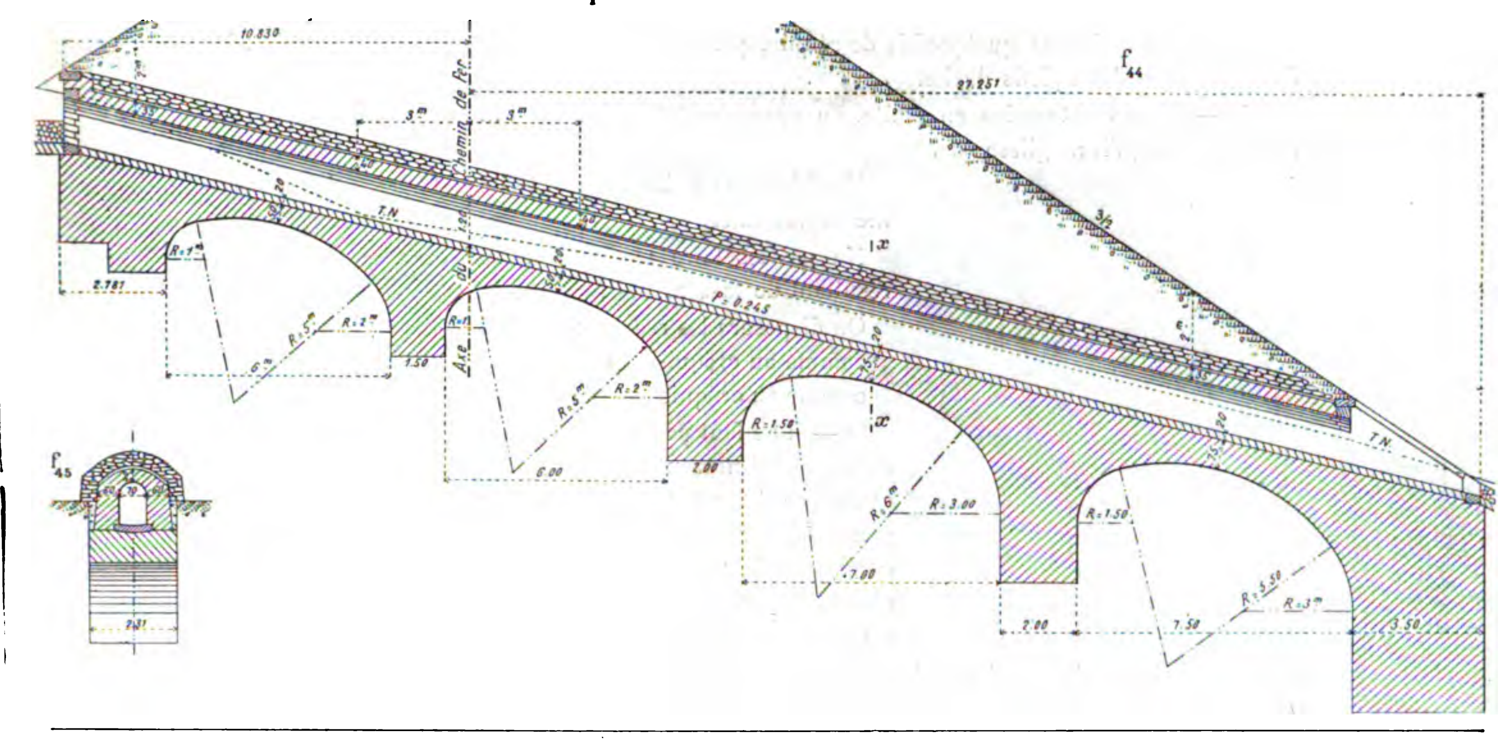
Ponceau voûté de 2m00 d'ouverture, biais à 50°



en travers sur xx des coupes en long — 5mm

LIGNE DE BRIOUDE A SAINT-FLOUR

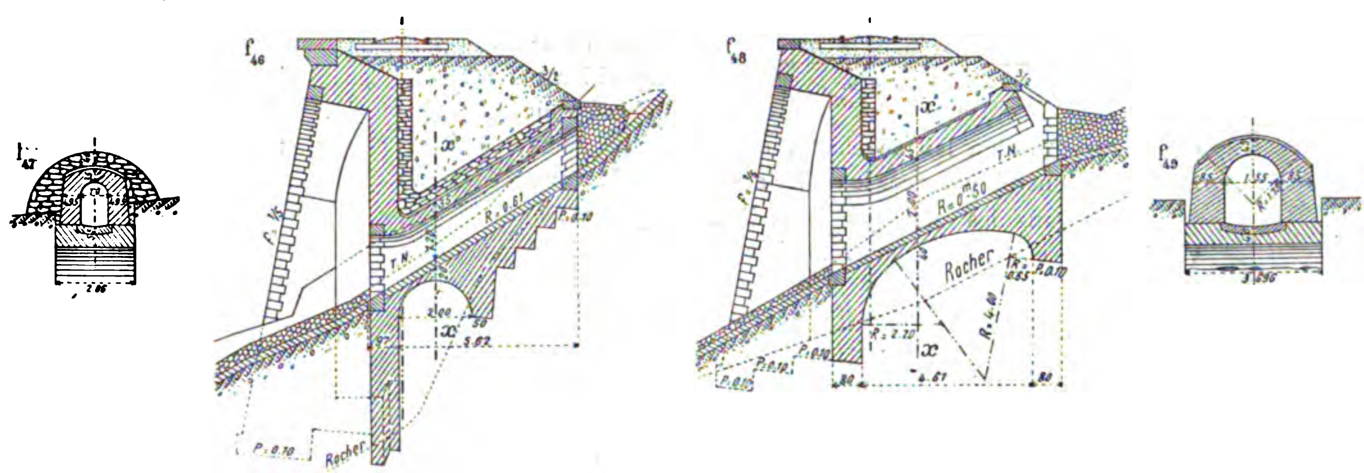
Aqueduc voûté de 0m70 d'ouverture



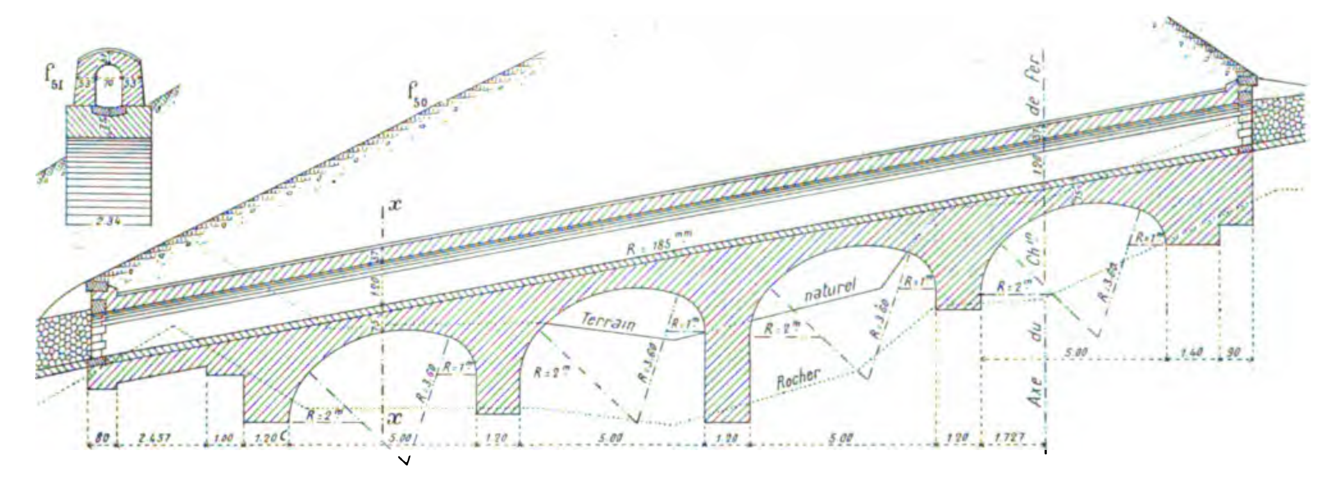


LIGNE DE MOREZ A SAINT-CLAUDE

Aqueduc voûté de 0m70 d'ouverture **Ponceau voûté de 1m50 d'ouverture**

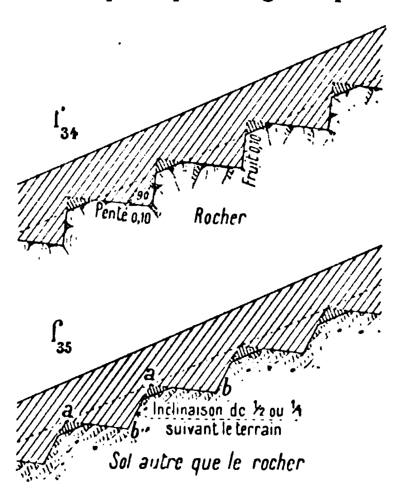


Aqueduc voûté de 0m70 d'ouverture



6° — Il conviendra quelquefois de réunir, par une voûte dont l'extrados forme radier, les fondations des deux pieds-droits.

7° — Dans les terrains en pente, on accroche très solidement l'ouvrage au sol par des redans, pour qu'il ne glisse pas.



Ne faire des redans que dans les terrains à peu près incompressibles.

Ne pas les faire trop hauts, afin d'éviter des fissures résultant de tassements inégaux.

On disposera les redans :

comme au croquis (f_{34}) si l'on est sur rocher ;

comme au croquis (f_{35}) si l'on n'est pas sur rocher.

8° — Il ne faut pas placer systématiquement le radier des ouvrages au niveau du fond du lit des cours d'eau, même quand ce lit est tout à fait plat ; d'abord, parce qu'en général les terres de surface sont moins résistantes et plus compressibles ; ensuite, parce qu'il y a tout avantage à faire aboutir les eaux, tout au moins à l'aval de l'ouvrage, dans un fossé d'un peu de profondeur pour les y concentrer, et les empêcher de s'éparpiller à la surface du sol. Il n'y a évidemment pas de règle générale pour la profondeur des fossés d'amont et d'aval ; à moins de circonstances locales spéciales, on peut admettre 0^m25 à 0^m30 pour un ouvrage de 0^m60 ; 0^m30 à 0^m40 pour un aqueduc de 1^m, etc...

9° — Il peut arriver qu'un radier AB (f_{36}), tout en ayant ses extrémités A et B assez enfoncées dans le terrain naturel, soit en remblai au-dessus de trous C et D. On peut accepter cette disposition en remplissant les trous, soit de pierres sèches rangées à la main, soit de gravier pilonné arrosé d'un lait de chaux, ou, plus simplement, de terre pilonnée ; mais il vaut mieux, en général, enfoncer le radier au-dessous des trous



10° — Dans les ouvrages à radier, la profondeur des parafouilles dépend de la vitesse des eaux, de leur rétrécissement sous l'ouvrage, et de l' « affouillabilité » du terrain.

11° — Il y a généralement avantage, pour les ouvrages sur torrents, à tenir le radier en contre-bas du lit actuel, de 0^m50 à 0^m80 suivant les cas ; les apports ont vite comblé le dessus du radier et le garantissent ; dans ce cas, on augmentera la hauteur des pieds-droits de la hauteur présumée des apports.

12° — Dans les alluvions très meubles à grandes déclivités, le radier général doit être défendu, à l'amont et à l'aval, par un parafouille s'étendant entre les bouts des deux murs en aile, avec une profondeur dépendant de l' « affouillabilité » du lit, de la pente, de l'étranglement sous l'ouvrage, etc... (en général de 2^m à 5^m).

Dans ces terrains, les radiers sont souvent affouillés par l'aval, il faut défendre l'aval par des enrochements.

A l'abri de ces parafouilles, il est inutile, sauf en mauvais terrain, d'enfoncer les culées en contre-bas du radier.

13° - Quand le radier et le lit à l'aval ont peu de pente, et que les eaux charrient, il y a quelquefois, pour les aqueducs de 0^m60 à 1^m00, avantage, pour éviter les obstructions par l'aval, à tenir l'aval du radier en contre-haut du lit, de 0^m40 à 0^m50.

CHAPITRE XIII

PRINCIPALES DIMENSIONS ET DISPOSITIONS

DES OUVRAGES DE 8^m ET AU-DESSOUS

Les dessins, les dimensions, les matériaux, sont donnés au Titre II :

CHAPITRE XIV

DESSINS A PRODUIRE

Art. 1. — Nomenclature.

1° — Plan au 1/500e (0^{m}002) avec courbes de niveau de mètre en mètre, mais sans cotes, s'étendant assez loin de part et d'autre de l'ouvrage pour s'assurer que la direction est bonne, que les eaux y entrent bien, en sortent bien.

Il pourra, dans certains cas, être supprimé pour les ouvrages de moins de 1^{m}00 : on se contentera alors des indications du plan de travaux à 1/1.000.

2° — Profil en long au 1/500e pour les hauteurs et les longueurs. Il sera prolongé de ce qu'il faut, à l'amont et à l'aval ; il donnera la cote de la plate-forme sur l'axe, la longueur totale de l'ouvrage, les cotes du terrain naturel et du lit, les pentes de l'ouvrage et du lit.

3° — Coupe en long de l'ouvrage avec les sondages.

4° — Demi-plan, les maçonneries découvertes, et demi-plan au niveau des fondations, limités à l'axe parallèle aux pieds-droits.

5° — Elévation amont, élévation aval.

6° — Une coupe en travers avec indication du terrain, — ou plusieurs coupes en travers, si, en raison de la surcharge du remblai, il y a des épaisseurs différentes.

7° — Détails au 1/20e aussi restreints que possible.

Ne rien mettre d'inutile sur les dessins.

Ne pas tracer les lits des voussoirs, ne pas dessiner de moellons ordinaires, ne faire aucune projection de coupe en pointillé...

Art. 2. — Echelles.

Pour les ouvrages de 3^m et au-dessus, la coupe en long (3°), les demi-plans (4°), les élévations et coupes (5° et 6°) seront à l'échelle de 1/100e.

Pour les ouvrages de moins de 3^m, les élévations (5°) et coupes (6°) seront au 1/50e.

La coupe en long (3°) et les deux demi-plans (4°) qui sont toujours à la même échelle seront en général au 1/50e ; s'ils étaient trop grands, au 1/100e.

TITRE II

DESSINS — TABLEAUX

CHAPITRE I

OUVRAGES SOUS RAILS EN PLEIN CINTRE

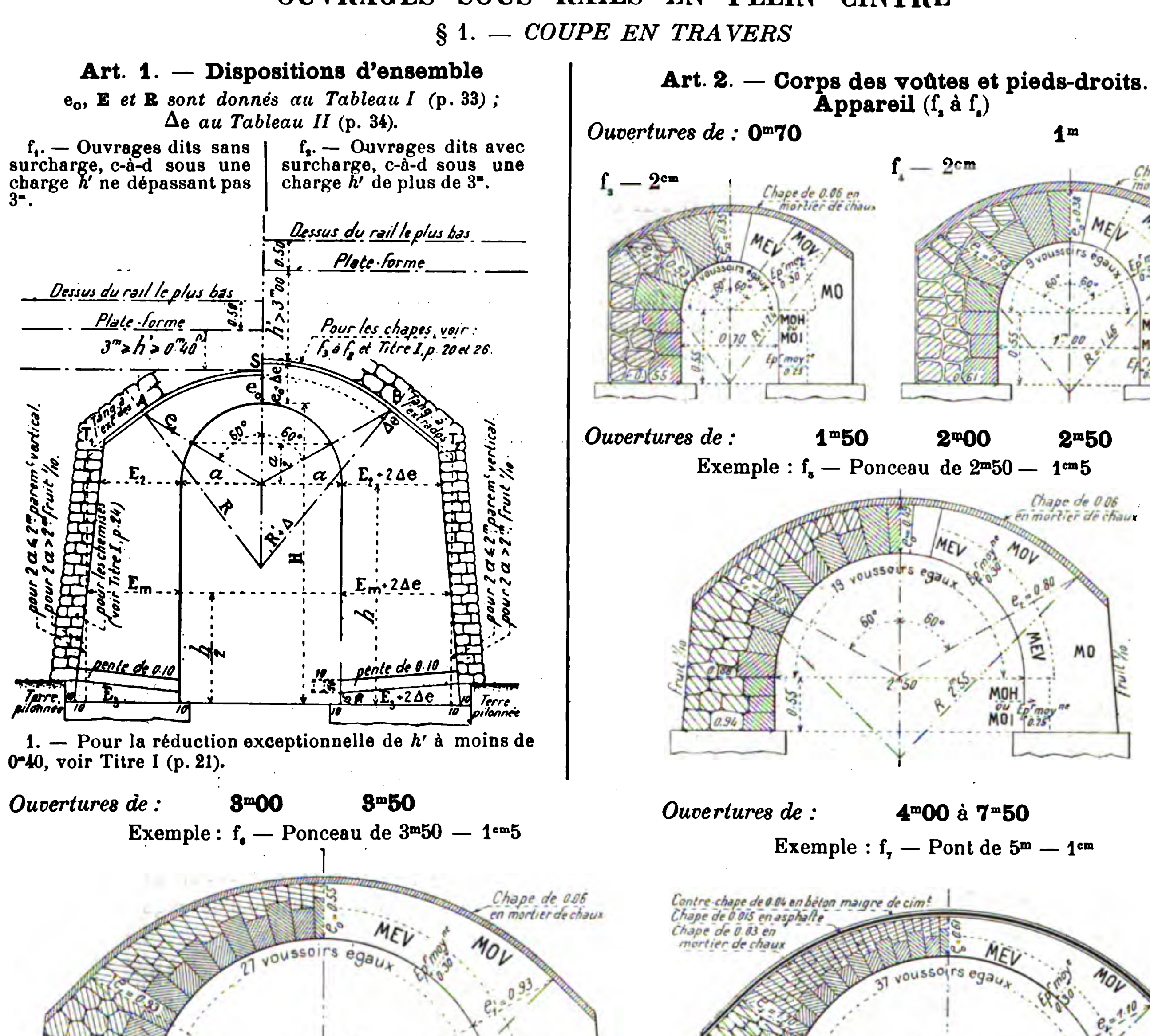
§ 1. — *COUPE EN TRAVERS*

Art. 1. — Dispositions d'ensemble

e_0, **E** *et* **R** *sont donnés au Tableau I* (p. 33) ; Δe *au Tableau II* (p. 34).

f_1. — Ouvrages dits sans surcharge, c-à-d sous une charge h' ne dépassant pas 3^{m}.

f_2. — Ouvrages dits avec surcharge, c-à-d sous une charge h' de plus de 3^{m}.



1. — Pour la réduction exceptionnelle de h' à moins de $0^{m}40$, voir Titre I (p. 21).

Art. 2. — Corps des voûtes et pieds-droits. Appareil (f_3 à f_8)

Ouvertures de : $0^{m}70$ — 1^{m}

f_3 — 2^{cm} ; f_4 — 2^{cm}

Ouvertures de : $1^{m}50$ — $2^{m}00$ — $2^{m}50$

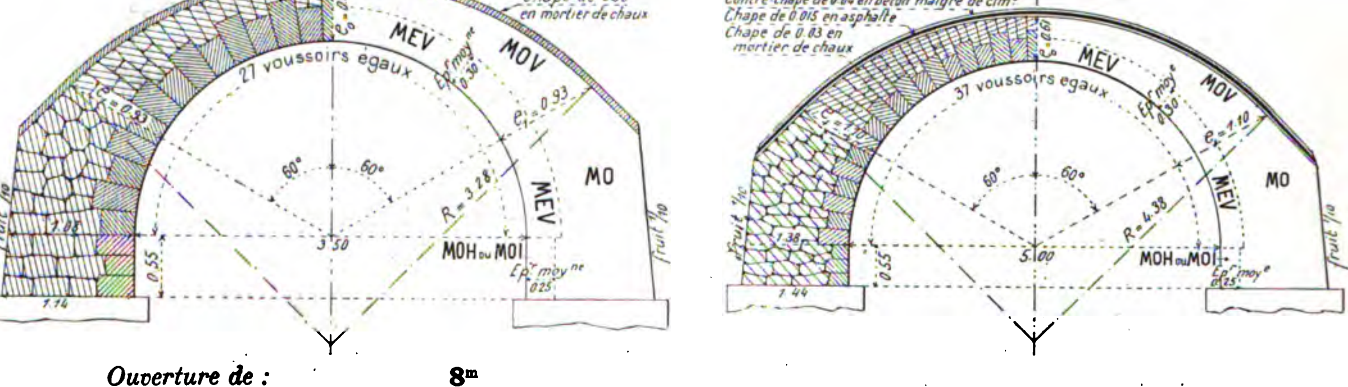
Exemple : f_5 — Ponceau de $2^{m}50$ — $1^{cm}5$

Ouvertures de : $3^{m}00$ — $3^{m}50$

Exemple : f_6 — Ponceau de $3^{m}50$ — $1^{cm}5$

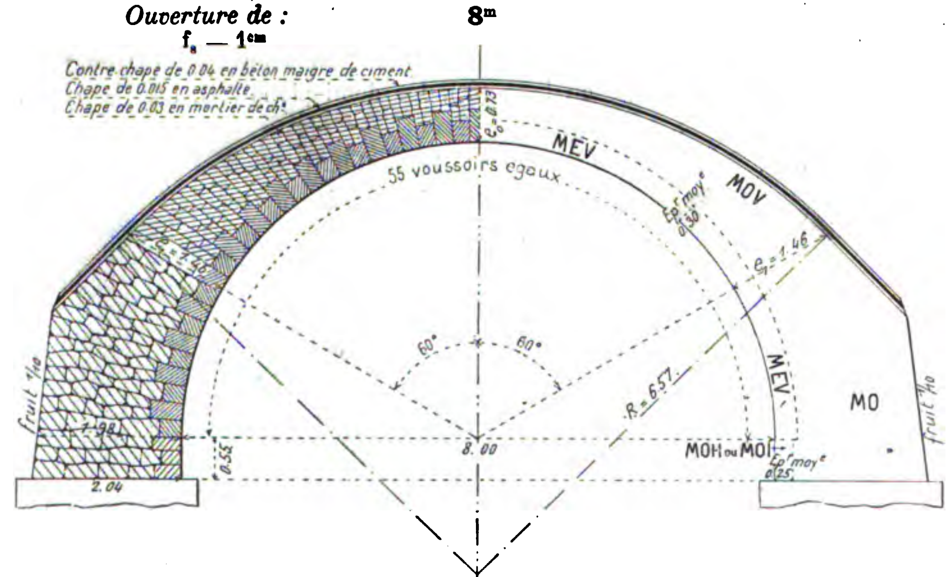
Ouvertures de : $4^{m}00$ à $7^{m}50$

Exemple : f_7 — Pont de 5^{m} — 1^{cm}



Ouverture de : 8^{m}

f_8 — 1^{cm}



NOTA

La moitié de gauche de chaque figure montre comment l'ouvrage sera réellement exécuté. — La moitié de droite indique comment les différentes natures de matériaux seront indiquées et représentées au projet sur la coupe en travers.

Ces coupes supposent que la hauteur des pieds-droits est réduite au minimum de $0^{m}55$ (p. 10) et que la charge de remblai au-dessus de la chape est $\leqslant 3^{m}$.

Pour le sens de MO, MOV,... voir Titre I, (p. 26).

Art. 3. — Dimensions. — TABLEAU I. — *Ouvrages sans surcharge ou sous une charge ne dépassant pas 3m* (Voir f₁)

Ouverture	Epaisseur à la clef $e_0 = 0{,}19\,(1+\sqrt{2a})$	Rayon d'extrados $R = 0{,}73\,(1+2a)$	Epaisseur au milieu de la montée	Epaisseur des pieds-droits de hauteur h à $\frac{h}{2}$ des naissances :[2] $E_m = 0^m30 + 0{,}40\,a + 0{,}20\,h$	Distance verticale entre la plate-forme et le dessous de la clef[3]	Revanche minima au-dessus des plus hautes eaux: du dessous de la clef	Revanche minima au-dessus des plus hautes eaux: de la plate-forme[3]	Ouvrages servant à l'écoulement des eaux — Hauteurs sous réserve d'assurer dans tous les cas la revanche nécessaire au-dessus des hautes-eaux — sous clef: minima	sous clef: MAXIMA	des pieds-droits: minima	des pieds-droits: MAXIMA	sous plate-forme: minima[3]	sous plate-forme: MAXIMA	Ouvrages servant de passage — Hauteurs — sous clef: minima	sous clef: MAXIMA	des pieds-droits: minima	des pieds-droits: MAXIMA	sous plate-forme: minima[3]	sous plate-forme: MAXIMA
										$H_m - a$	$H_M - a$					$H'_m - a$	$H'_M - a$		
$2a$	e_0	R	e_1	E_m	d	r	$r+d$	H_m	H_M	h_m	h_M	$H_m + d$	$H_M + d$	H'_m	H'_M	h'_m	h'_M	$H'_m + d$	$H'_M + d$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
m 0.60	m 0.34	m 1.17	m 0.51	m 0.42 + 0.20 h	m 0.80	m 0.25	m 1.05	m 0.85	m 1.30			m 1.65	m 2.10	»	»	»	»	»	»
0.70	0.35	1.24	0.53	0.44 + 0.20 h	0.81	0.25	1.06	0.90	1.35			1.71	2.16	»	»	»	»	»	»
1.00	0.38	1.46	0.58	0.50 + 0.20 h	0.84	0.35	1.19	1.05	1.50			1.89	2.34	Passages 2m00				2m84	2m84
1.50	0.42	1.82	0.66	0.60 + 0.20 h	0.88	0.50	1.38	1.30	1.75			2.18	2.63	particuliers 2.25				3.13	3.13
2.00	0.46	2.19	0.74	0.70 + 0.20 h	0.92	0.60	1.52	1.55	2.00			2.47	2.92	pour piétons 2.50		1m50		3.42	3.42
2.50	0.49	2.55	0.80	0.80 + 0.20 h	0.95	0.70	1.65	1.80	2.25			2.75	3.20	et bestiaux 2.75				3.70	3.70
3.00	0.52	2.92	0.86	0.90 + 0.20 h	0.98	0.80	1.78	2.05	2.50	0m55	1m00	3.03	3.48	Chemins 3.50		2m00		4.48	4.48
3.50	0.55	3.28	0.93	1.00 + 0.20 h	1.01	0.90	1.91	2.30	2.75			3.31	3.76	ruraux 3.75				4.76	4.76
4.00	0.57	3.65	0.99	1.10 + 0.20 h	1.06	1.10	2.16	2.55	3.00			3.61	4.06	Chemin vl ordinaire 5m	5m00	3m00	3m00	6.06	6.06
5.00	0.61	4.38	1.10	1.30 + 0.20 h	1.10	1.20	2.30	3.05	3.50			4.15	4.60	Ch. de grde commun 5	5.50	2.50	3.00	6.10	6.60
6.00	0.66	5.11	1.23	1.50 + 0.20 h	1.15	1.30	2.45	3.55	4.00			4.70	5.15	» »	»	»	»	»	»
7.00	0.69	5.84	1.34	1.70 + 0.20 h	1.18	1.40	2.58	4.05	4.50			5.23	5.68	Rte Dépte 5	6.50	1.50	3.00	6.18	7.68
8.00	0.73	6.57	1.46	1.90 + 0.20 h	1.22	1.50	2.72	4.55	5.00			5.77	6.22	Rte Natle 5	7.00	1.00	3.00	6.22	8.22

Si la hauteur maxima (H_M ou H'_M) *ne permet pas de couronner l'ouvrage au niveau de la plate-forme, on adoptera l'ouvrage sous charge de remblai en lui donnant la hauteur minima* (H_m ou H'_m).

2. Pour les ouvrages de plus de 2m, dans lesquels le parement postérieur des pieds-droits n'est plus vertical, mais en fruit de 1/10 (f₁), l'épaisseur des pieds-droits est : aux naissances $E_2 = E_m - 0{,}05\,h$; à la base : $E_3 = E_m + 0{,}05\,h$.

3. On a supposé, ce qui est le cas général, que le dessus de la chape est à 0m40 au-dessous de la plate-forme.

Art. 3. — Dimensions *(Suite)*. — TABLEAU II. — *Ouvrages sous charge de plus de* 3m. (Titre I, p. 16 et f₉)

Ouverture 2 *a*	Quantité Δ*e*, en centimètres, à ajouter à l'épaisseur à la clef e_0 et au rayon R, pour une hauteur de surcharge *h'* jusqu'à la plate-forme, de :												
	3m au plus	4m au plus	5m	6m	7m	8m	9m	10m	11m	12m	14m	16m	18m	20m et au-dessus
0m60 et 0m70	0cm	1cm	2cm	3cm	3cm	4cm	5cm	6cm	7cm	8cm	Pour 12m et au-dessus			
1m00	0	1	2	3	4	5	7	8	9	10				
1m50 et 2m00	0	1	3	4	5	6	8	10	12	13				
2.50 et 3.00	0	1	3	5	7	9	11	13	15	16	17cm	Pour 14m et au-dessus		
3.50 et 4.00	0	2	5	7	10	12	14	16	18	20	21			
5m00	0	2	6	9	12	15	17	19	21	23	24	25cm	Pour 16m et au-dessus	
6.00	0	3	7	10	13	16	19	22	24	26	27	28		
7.00	0	3	8	12	16	19	22	25	27	29	30	31	32cm	33cm
8.00	0	4	9	13	17	21	25	28	30	32	33	34	35	36

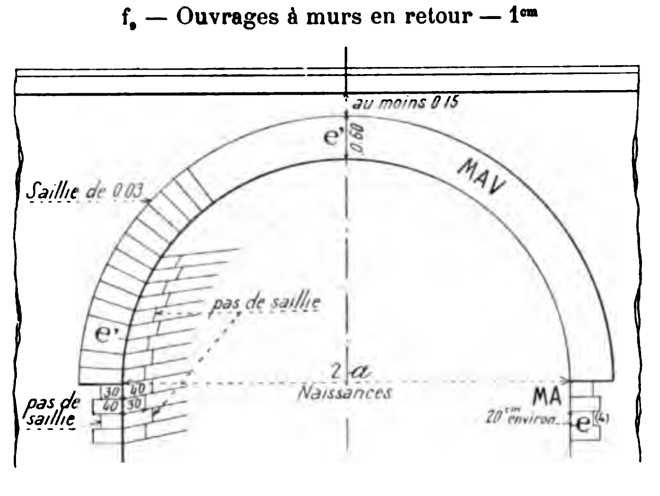
L'épaisseur aux naissances sera majorée de 2 Δ*e*. (Voir f₃).

Mêmes hauteurs minima de pieds-droits que pour les ouvrages non surchargés, c-à-d h_m ou h'_m (Tableau I, colonnes 11 et 17).

§ 2. — *BANDEAUX*

Types. — Dimensions

f₉ — Ouvrages à murs en retour — 1cm



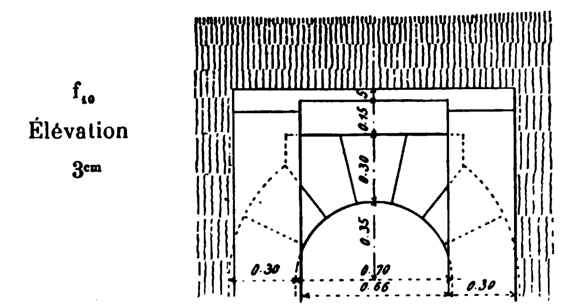
4. — Pour un moellon d'épaisseur *e*, il convient que sa plus petite longueur soit ⩾ 1,5 *e*, sa plus grande ⩽ 3 *e*.

TABLEAU III.

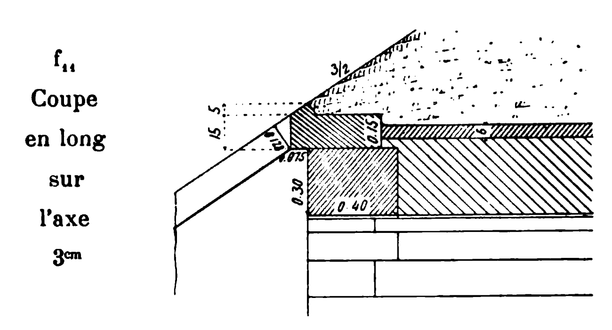
Ouverture 2*a*	Epaisseur du bandeau *e'*	Développement de l'intrados	Voussoirs du bandeau — Nombre	Epaisseur joints compris	Queues dans le sens de la douelle
0m60	0m30	0m942	5	0m188	0m30 et 0m40
0.70	0.30	1.100	7	0.157	
1.00	0.30	1.571	9	0.175	
1.50	0.30	2.356	13	0.181	
2.00	0.35	3.142	15	0.209	
2.50	0.35	3.927	19	0.207	
3.00	0.35	4.712	23	0.205	
3.50	0.40	5.498	27	0.204	
4.00	0.40	6.283	31	0.203	
5 00	0.45	7.854	37	0.212	
6.00	0.50	9.425	43	0.219	
7.00	0.60	10.996	49	0.224	0m35 et 0m40
8.00	0.60	12.566	55	0.228	0m35 et 0m50

Aqueducs de 0m60 et 0m70 à murs en aile, sous charge de remblai

f₁₀ Élévation 3cm



f₁₁ Coupe en long sur l'axe 3cm

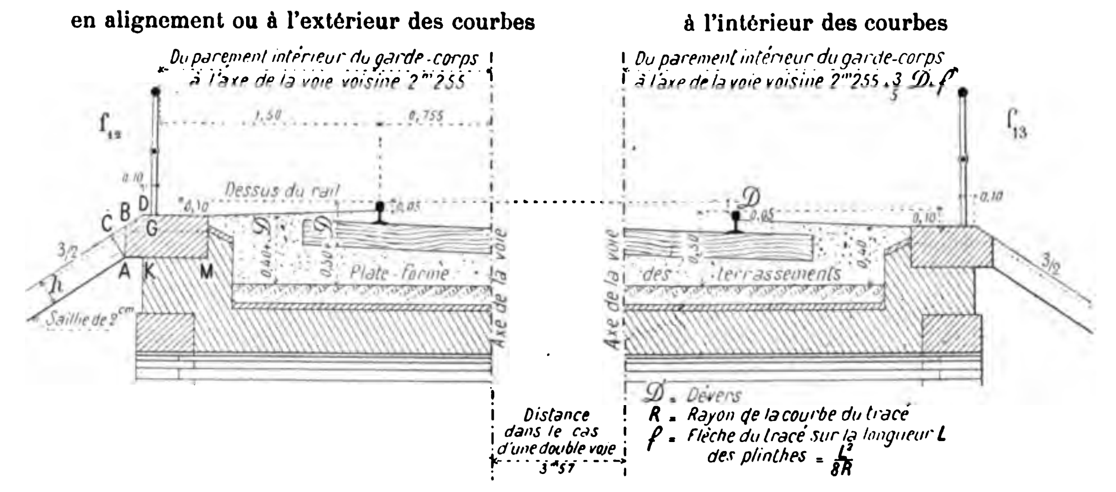


Art. 1. — Plinthes[5] et rampants

A. — Plinthe à 0m10 au-dessous du rail voisin

Position des garde-corps

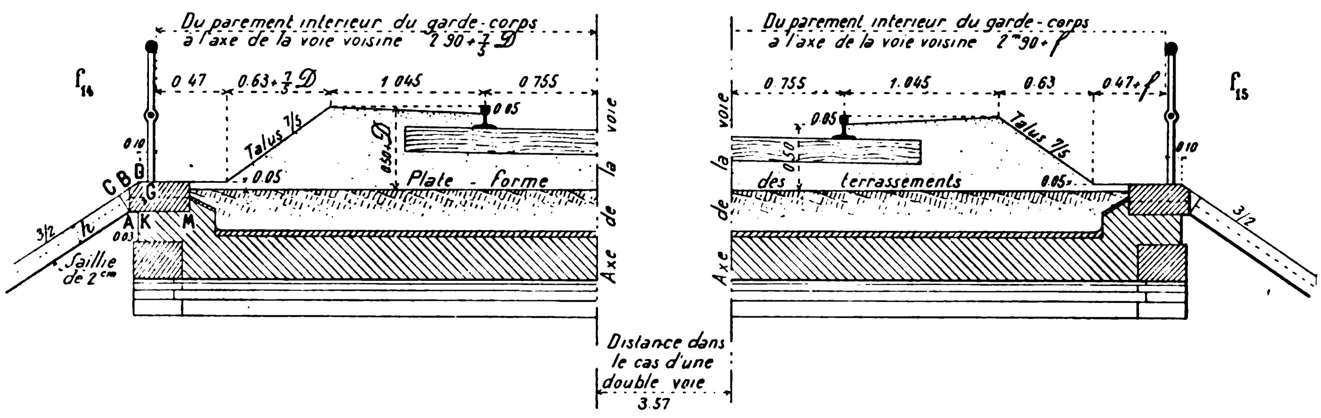
en alignement ou à l'extérieur des courbes — **à l'intérieur des courbes**



B. — Plinthe à 0m05 au-dessus de la plate-forme

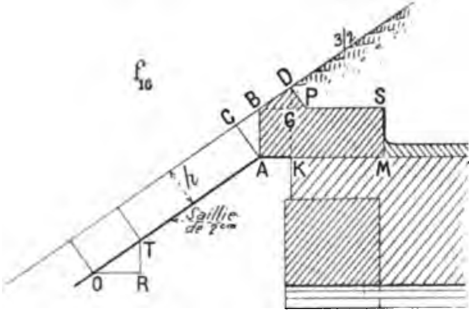
Position des garde-corps

en alignement ou à l'extérieur des courbes — **à l'intérieur des courbes**

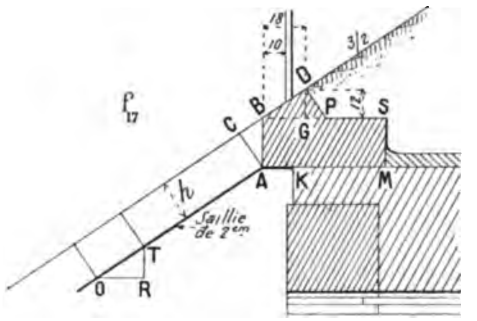


C. — Plinthe sous charge de remblai (p. 21)

sans garde-corps



avec garde-corps



La plinthe est celle des ouvrages sans surcharge, échancrée sur la hauteur DG. Pour les plinthes sans garde-corps, DG est donné au tableau IV. Pour les plinthes avec garde-corps, DG = 0m12. Dans les 2 cas, MS = AB, PG = 2/3 DG.

Tableau IV

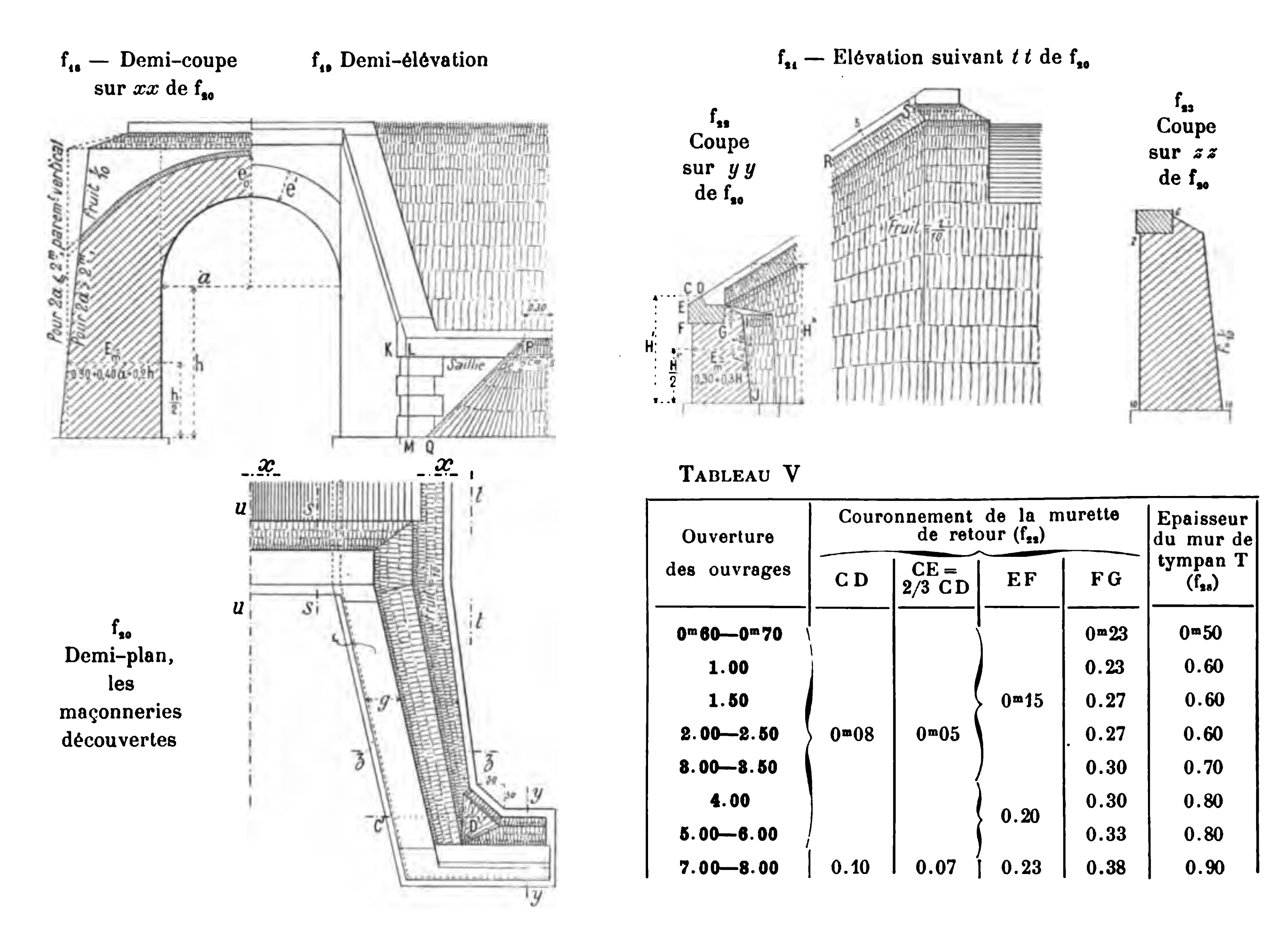
D. — Dimensions (f_{12} à f_{17})

Ouverture des ouvrages 2a	Plinthes: Longueur AM	Plinthes: Saillie AK	Plinthes: AB = 1.202 h	Plinthes: DG = 2/3 AK	Plinthes: BD = 1.202 AK	Plinthes: Epaisseur DK	Rampants: Largeur horizontale g (f_{20})	Rampants: Epaisseur h	Crossettes[6]: OR = 3/2 TR	Crossettes[6]: TR	Crossettes[6]: OT = 1.202 OR
0m60—0m70	0m40	0m075	0m15	0m05	0m09	0m20	0m30	0m125	0m25	0m166	0m30
1.00	0.45	0.075	0.15	0.05	0.09	0.20	0.30	0.125	0.25	0.166	0.30
1.50	0.50	0.105	0.18	0.07	0.126	0.25	0.40	0.15	0.30	0.20	0.36
2.00—2.50	0.50	0.105	0.18	0.07	0.126	0.25	0.40	0.15	0.30	0.20	0.36
3.00	0.55	0.12	0.20	0.08	0.144	0.28	0.45	0.166	0.35	0.233	0.42
3.50	0.55	0.12	0.20	0.08	0.144	0.28	0.45	0.166	0.35	0.233	0.42
4.00	0.55	0.12	0.20	0.08	0.144	0.28	0.45	0.166	0.35	0.233	0.42
5.00—6.00	0.60	0.15	0.22	0.10	0.18	0.32	0.45	0.18	0.35	0.233	0.42
7.00—8.00	0.60	0.15	0.25	0.10	0.18	0.35	0.50	0.21	0.40	0.266	0.48

5. — En courbe, les plinthes et les têtes des ouvrages à murs en aile seront droites et parallèles à la corde de la courbe du tracé sur la longueur des plinthes. Les distances à l'axe de la voie indiquées aux figures f_{12} à f_{15}, sont mesurées sur l'axe transversal de l'ouvrage.

6. — Si la hauteur du rampant est entre 1m50 et 3m00, une crossette ; au delà, une par chaque 1m50 de hauteur. — On traitera le parement O I R comme le reste du mur.

Art. 2. — Murs avec murettes de retour



f_{18} — Demi-coupe sur *xx* de f_{20}

f_{19} Demi-élévation

f_{21} — Elévation suivant *t t* de f_{20}

f_{22} Coupe sur *y y* de f_{20}

f_{23} Coupe sur *z z* de f_{20}

f_{20} Demi-plan, les maçonneries découvertes

TABLEAU V

Ouverture des ouvrages	Couronnement de la murette de retour (f_{22}) CD	CE = 2/3 CD	EF	FG	Epaisseur du mur de tympan T (f_{23})
0m60—0m70				0m23	0m50
1.00				0.23	0.60
1.50			0m15	0.27	0.60
2.00—2.50	0m08	0m05		0.27	0.60
3.00—3.50				0.30	0.70
4.00			0.20	0.30	0.80
5.00—6.00				0.33	0.80
7.00—8.00	0.10	0.07	0.23	0.38	0.90

Le talus du quart de cône PQ (f_{19}) sera de 3/2. En le gazonnant, on pourra le raidir à 1/1.

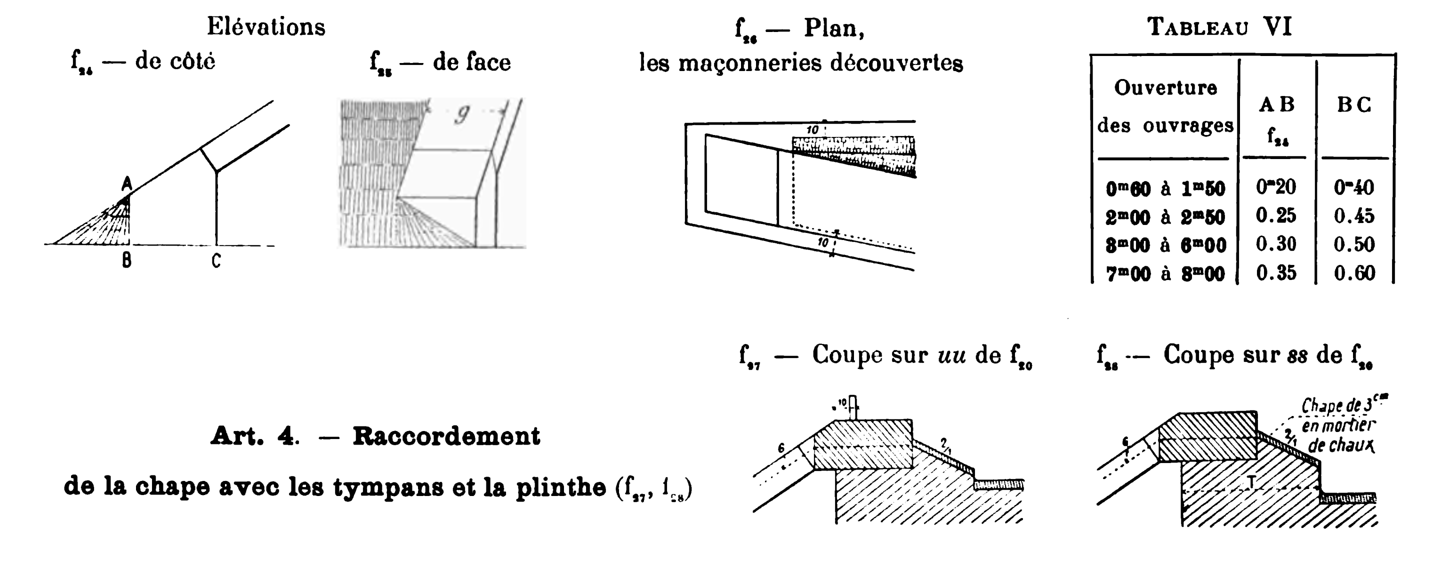
Les moellons d'appareil de la chaîne d'angle LM (f_{19}) auront, pour les ouvrages de 0m60 à 6m, 0m30 et 0m40, — de 7m et 8m, 0m35 et 0m45. L'about du dé KL (f_{19}) aura la même queue que les moellons les plus longs de la chaîne d'angle.

Si l'on doit gazonner le talus, l'arête supérieure R S (f_{21}) du mur en aile sera à 0m10 au lieu de 0m05 en contre-bas du dessus du rampant.

Le parement I J (f_{22}) sera vertical : 1° pour les ouvrages de 2m et au-dessous ; 2° quand la hauteur H' ne dépasse pas 2m.

L'épaisseur moyenne du mur en aile dans la section C' D' (f_{20}) passant par le pied du parement arrière du mur en retour sera calculée par la formule : $E_m = 0^m30 + 0^m30\ H''$, H'' (f_{22}) étant la hauteur du mur en aile dans la section C' D'.

Art. 3. — Murs avec dés au lieu de murettes de retour



Elévations

f_{24} — de côté

f_{25} — de face

f_{26} — Plan, les maçonneries découvertes

TABLEAU VI

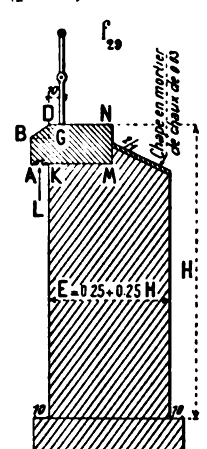
Ouverture des ouvrages	AB f_{24}	BC
0m60 à 1m50	0m20	0m40
2m00 à 2m50	0.25	0.45
3m00 à 6m00	0.30	0.50
7m00 à 8m00	0.35	0.60

f_{27} — Coupe sur *uu* de f_{20}

f_{28} — Coupe sur *ss* de f_{20}

Art. 4. — Raccordement de la chape avec les tympans et la plinthe (f_{27}, f_{28})

Art. 1. — Tracé. — Arasement. — Position des garde-corps. — Pour les ouvrages courants, on n'adoptera qu'exceptionnellement les murs en retour (p. 11). — En courbe, les plinthes, têtes, murs en retour, seront courbes et parallèles à la courbe du tracé (p. 22). — Pour les ouvrages couronnés au niveau du rail ou au niveau de la plate-forme, les plinthes seront arasées, et les garde-corps disposés comme pour les murs en aile (voir f_{12} à f_{13}), sauf que, les plinthes étant courbes, il n'y aura pas à tenir compte de la flèche f du tracé sur la longueur des plinthes (p. 22).



Art. 2. — Coupe en travers. — Quand les murs ne seront pas fermés par une cloison du côté des terres, on leur donnera l'épaisseur : $E = 0^m25 + 0{,}25\,H$ (f_{29}).

Toutefois, l'intervalle entre parements intérieurs des murs en retour d'une même culée ne devra pas descendre au-dessous de 2^m.

Quand la hauteur H atteindra 4 ou 5^m, et même, dans certains cas, pour des hauteurs moindres, on évidera la culée, soit par des puits circulaires remplis de déblais rocheux (f_{30}), soit par des voûtes d'évidement transversales, ... : ces dispositions feront l'objet d'une étude spéciale.

Art. 3. — Plinthe (f_{29}).

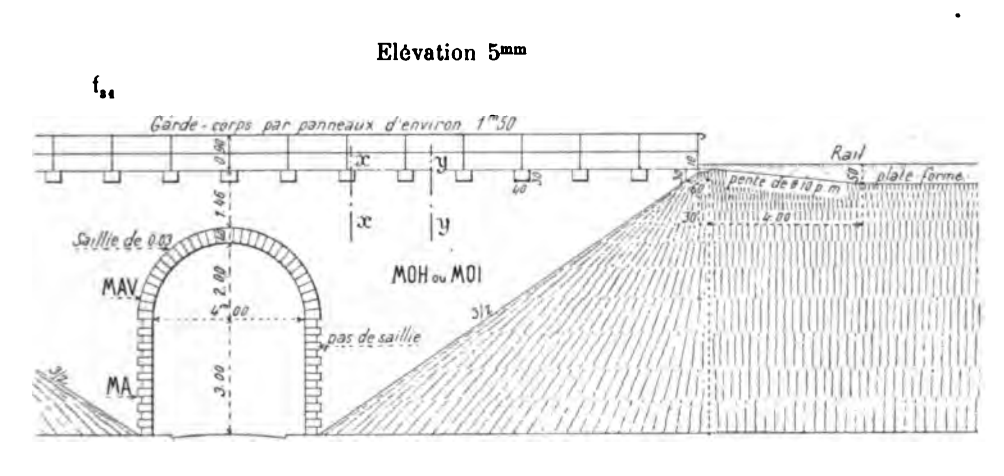
TABLEAU VII

Ouverture des ouvrages	Longueur AM	Saillie AK	Epaisseur MN	AB	DG	BG=2DG	
Jusqu'à 2^m inclus	0^m50	0^m10	0^m25	0^m18	0^m06	0^m12	Pour les ouvrages de plus de 2^m, on creusera un larmier L (f_{29}).
De 2^m à 6^m inclus	0.60	0.15	0.30	0.21	0.08	0.16	
De 6^m à 8^m	0.70	0.20	0.35	0.25	0.10	0.20	

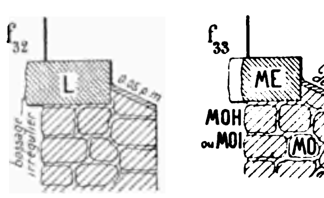
Art. 4. — Couronnement des ouvrages courants en rase campagne

Exemple. — Passage inférieur voûté de 4^m

Elévation 5^{mm}



Coupes sur *xx* de f_{31} sur *yy* de f_{31}



Face supérieure des dés arasée aux mêmes niveaux que les plinthes des ouvrages à murs en aile couronnés au niveau du rail ou de la plate-forme (p. 21).

Il convient que la verticale de la clef coïncide avec le milieu d'un panneau du garde-corps, à défaut, avec un montant.

§ 5. — *RADIERS*

Art. 1. — Coupe en travers

TABLEAU VIII

Ouverture $2a$	Flèche f	Epaisseur g
0^m60 - 0^m70	0^m05	0^m35
1^m00 - 1^m50	0.075	0.35
2.00	0.10	0.40
3.00 - 3.50	0.125	0.40
4.00	0.15	0.45
5.00	0.175	0.50
6.00 - 7.00	0.20	0.55
8.00	0.25	0.60

Art. 2. — Garde-radiers. — Parafouilles

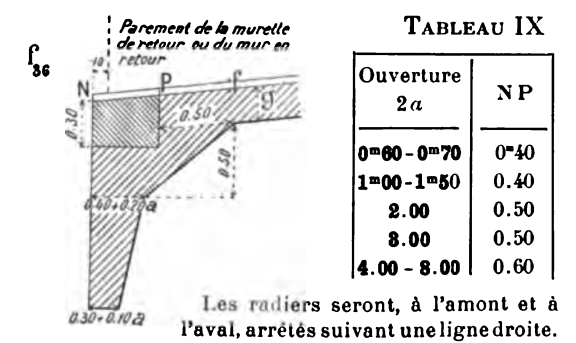


TABLEAU IX

Ouverture $2a$	NP
0^m60 - 0^m70	0^m40
1^m00 - 1^m50	0.40
2.00	0.50
3.00	0.50
4.00 - 8.00	0.60

Les radiers seront, à l'amont et à l'aval, arrêtés suivant une ligne droite.

OUVRAGES DROITS SOUS RAILS EN ELLIPSE SURHAUSSÉE

PORTÉE DE 2^m ET PLUS — SURCHARGE DE PLUS DE 5^m

(Titre I. p. 15)

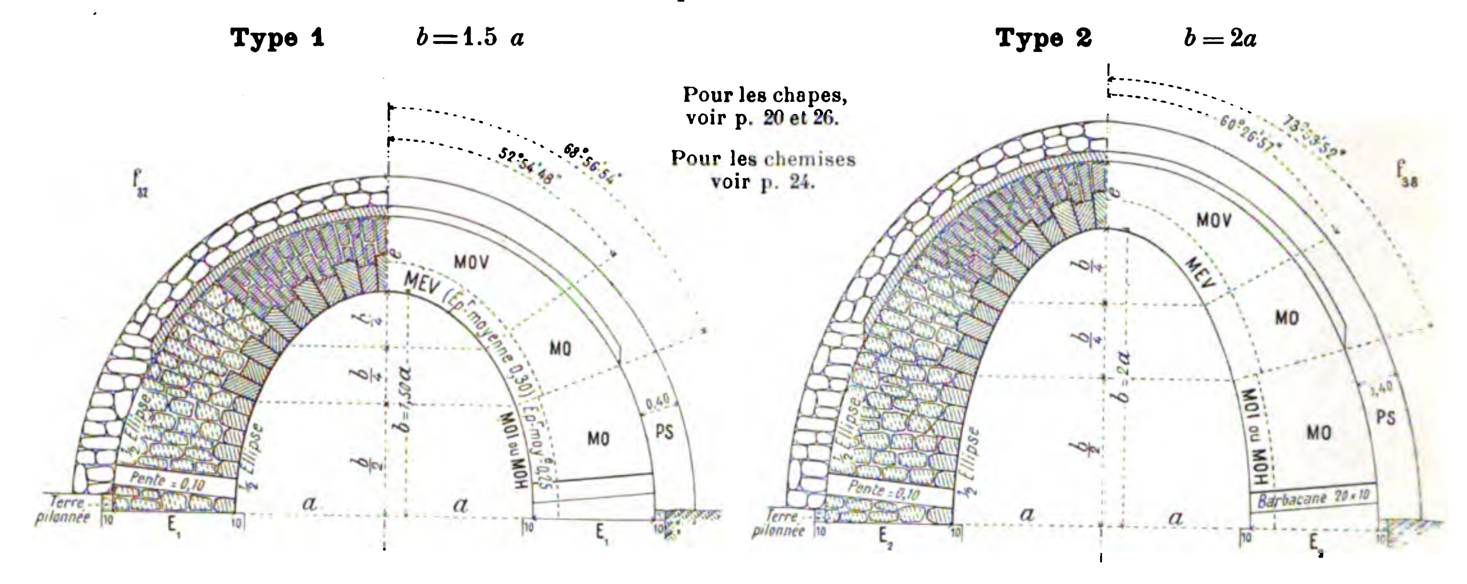
§ 1. — *CORPS*

Coupe en travers

Type 1 $b = 1.5\ a$ **Type 2** $b = 2a$

Pour les chapes, voir p. 20 et 26.

Pour les chemises voir p. 24.



Epaisseurs
$$\begin{cases} e = e_0 + \Delta e \\ E_1 = e_0 + 0{,}2a + 2\,\Delta e \\ E_2 = e_0 + 0{,}3a + 2\,\Delta e \end{cases}$$

Pour les matériaux, voir p. 26.

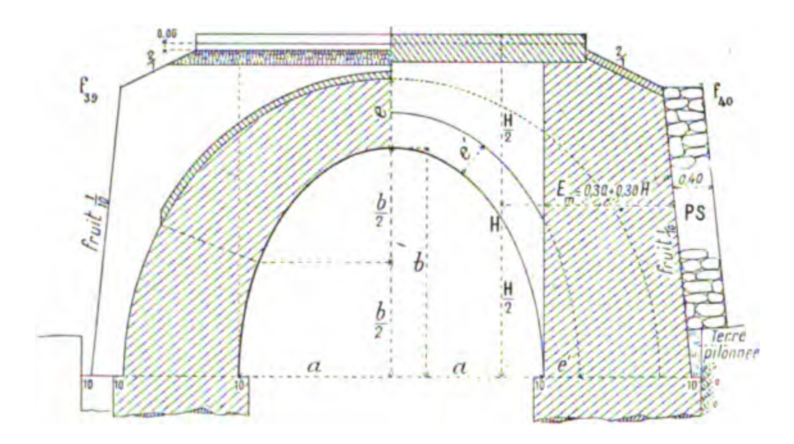
On donne les valeurs numériques de :

$e_0 = 0{,}19\ (1 + \sqrt{2a})$........... Tableau I, p. 33.

Δe, surépaisseur à la clef........ Tableau II, p. 34

§ 2. — *TÊTES*

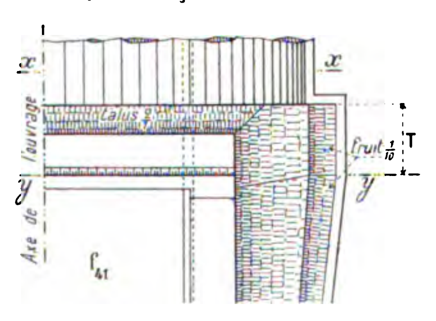
Demi-coupe sur xx de f_{41} Demi-coupe sur yy de f_{41}



L'extrados du bandeau est une courbe parallèle à l'ellipse.
(Tome III, p. 329).

(f_{41})
L'épaisseur T du tympan est donnée au Chap. I, Tableau V, p. 36.

Plan, les maçonneries découvertes



Bandeaux

Ouverture $2a$	Epaisseur [7] e'	Développement de la demi-ellipse d'intrados Type 1	Type 2	Nombre de voussoirs Type 1	Type 2	Queue dans le sens de la douelle
2m00	0m35	3m97	4m84	19	25	0m30 et 0m40
2.50	0.35	4.96	6.05	25	29	
3.00	0.35	5.95	7.27	29	35	
3.50	0.40	6.94	8.48	33	41	
4.00	0.40	7.93	9.69	37	47	
5.00	0.45	9.91	12.11	45	57	
6.00	0.50	11.90	14.53	53	65	
7.00	0.60	13.88	16.95	61	75	0.35 et 0.50
8.00	0.60	15.86	19.38	69	85	

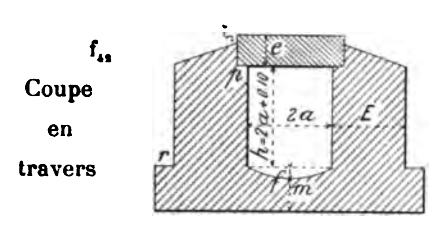
Voir pour :

les plinthes, rampants, crossettes. art. 1, p. 35.
les murs en aile, murettes de retour, dés.................. art. 2, p. 36.
les radiers..................... art. 1, p. 37.
les matériaux autres que ceux du corps de la voûte............ p. 26.

7. La même que pour les pleins cintres (p. 34, Tableau III).

DALOTS

(Voir, p. 13)



f_{41} Coupe en travers

Ouvrages couronnés au niveau du chemin (coupes en long)

avec murs en aile — f_{43} ; avec mur en retour — f_{44}

Ouverture 2a	Epaisseur de la dalle e	Largeur d'appui p	Epaisseur des pieds-droits E	Epaisseur minima du radier m	Flèche du radier f	Retraite de la fondation r
A. — Sous rails						
0^{m}60	0^{m}25	0^{m}15	0^{m}50	0^{m}35	0^{m}05	0^{m}10
0.70	0.30	0.20	0.55	0.40		
0.80	0.30	0.20	0.60	0.40		
B. — Hors la voie						
0.20	0.10	0.05	0.30	0.10	0.00	0.05
0.30	0.10	0.05	0.30	0.15		
0.40	0.15	0.05	0.35	0.20		
0.50	0.15	0.10	0.35	0.20		
0.60	0.20	0.10	0.40	0.30	0.05	0 10
0.70	0.20	0.10	0.40	0.30		
0.80	0.25	0.15	0.45	0.30		

Si, exceptionnellement, par exemple pour permettre à un homme de passer, on est obligé de dépasser la hauteur $h = 2a + 0^{m}10$, on calculera E par la formule : $E = 0^{m}15 + 0{,}30\,a + 0{,}20\,h$.

On ne mettra de garde-corps que sur les ouvrages de 0^{m}50 et au-dessus, quand la hauteur entre le dessus de la plinthe et le radier dépasse 1^{m}.

En rase campagne, le rampant sera en moellons ordinaires ; la plinthe, en libages sans chanfrein, sans saillie sur la tête.

CHAPITRE IV

BUSES

(Voir p. 13)

CORPS

SOUS RAILS

Coupe en travers (f_{45})

Dimensions

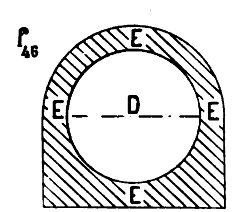
D	a	b	c	d	f	Cube par m. cour^{t} B$_1$	Cube par m. cour^{t} B$_2$
0^{m}60	0^{m}10	0^{m}10	0^{m}20	0^{m}20	0^{m}11	0^{mc}220	0^{mc}670
0.80	0.11	0.15	0.30	0.25	0.17	0. 314	1. 206

Composition :

B$_1$	B$_2$
Ciment......... 800^{k}	Mortier de chaux à 300^{k}........ 1 vol.
Sable et «graville» de 2 cm....... 1 mc	Gravier de 2 cm à 3 cm........ 2 vol.

HORS LA VOIE

Coupe en travers



f_{46}

Composition :
Mortier de ciment à 500^{k} 1 vol.
Gravier ou pierre cassée de 3 cm.............. 1 vol.

Dimensions

D	$E = 0{,}06 + \frac{D}{10}$	Cube par m. courant
0^{m}30	0^{m}09	0^{mc}135
0.40	0.10	0. 196
0.50	0.11	0. 266
0.60	0.12	0. 347
0.70	0.13	0. 438
0.80	0.14	0. 539

TÊTES

Type I

f_{47}

Au-dessus du plan XX (f_{47}), la buse est coupée par une droite normale à son axe s'appuyant sur cet axe et sur l'ellipse intersection du plan du talus avec le cylindre d'extrados.[8]

Au-dessous, la tête est dans le plan du talus.

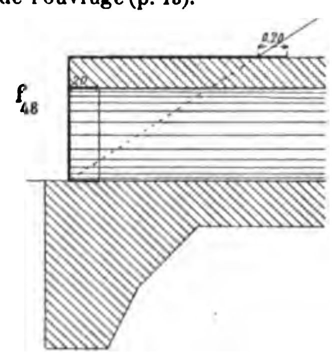
On peut couper par le plan vertical ZZ le bec de flûte *m p*.

La tête sera entourée de gazon sur 0^{m}30.

8. L'intersection de cette surface avec le cylindre d'intrados est une ellipse qui se projette sur le plan vertical passant par l'axe de la buse, suivant la droite *m n* (f_{47}).

Type II

Applicable quand la buse est faite par tuyaux pilonnés à côté de l'ouvrage (p. 13).



f_{48}

Quand on ne craindra pas d'affouillements, spécialement pour les buses hors la voie, on réduira le parafouille à un bourrelet de 10^{cm} × 10^{cm}. On pourra même le supprimer.

On garnira d'un enduit au mortier de ciment de 2^{cm} la partie vue de la tête, et, sur 0^{m}20, l'intérieur de la buse et la partie de l'extrados qui sera recouverte de remblai.

OUVRAGES BIAIS SOUS CHARGE DE REMBLAI

AU TALUS DE 3/2

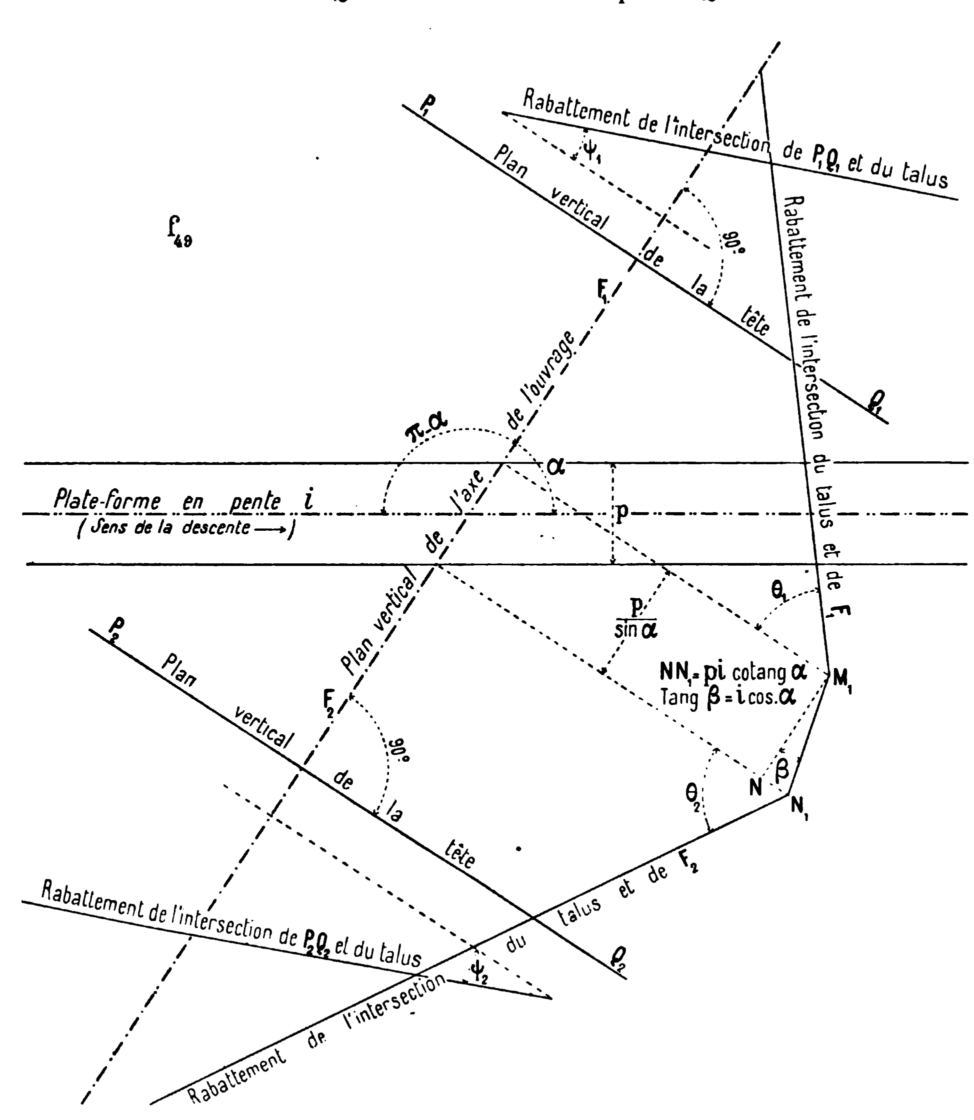
VOÛTES ET TÊTES DROITES — PLINTHES RAMPANTES

(Voir Titre I, p. 17)

Les têtes sont dans un plan vertical PQ perpendiculaire au plan vertical F de l'axe de l'ouvrage.

L'arête du couronnement d'une tête PQ est l'intersection du plan PQ et du talus de remblai.

f. 49



Côté	Angle avec le sens de la descente	Angle avec la verticale de l'intersection du talus de remblai et du plan F	Inclinaison sur l'horizon de l'arête rampante, intersection du talus de remblai et du plan de tête PQ
F_1	α (angle aigu)	$\text{Tang } \theta_1 = \dfrac{3}{2 \sin \alpha + 3 i \cos \alpha}$	$\text{Tang } \psi_1 = \dfrac{2}{3} \cos \alpha - i \sin \alpha$
F_2	$\pi - \alpha$ (angle obtus)	$\text{Tang } \theta_2 = \dfrac{3}{2 \sin \alpha - 3 i \cos \alpha}$	$\text{Tang } \psi_2 = \dfrac{2}{3} \cos \alpha + i \sin \alpha$

LIVRE II

VIADUCS

SOUS CHEMIN DE FER A VOIE NORMALE

A ARCHES ÉGALES EN PLEIN CINTRE

A UN SEUL ÉTAGE

TITRE I

VIADUCS EN ALIGNEMENT DROIT ET EN PALIER

CHAPITRE I

CONDITIONS IMPOSÉES PAR LA CIRCULATION DES TRAINS ET PAR CELLE DES AGENTS

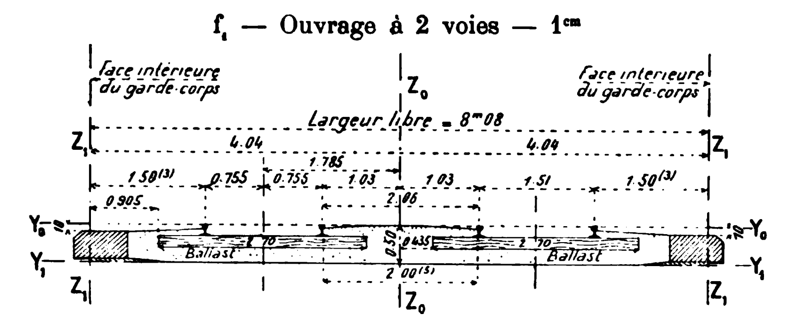
Art. 1. — Pourquoi il faut arrêter d'abord le dessus.

Un pont, un viaduc, sont faits pour la circulation; c'est le dessus qui l'assure: c'est donc lui qui mène l'étude et règle le dessous.

Art. 2. — Largeur libre entre garde-corps.

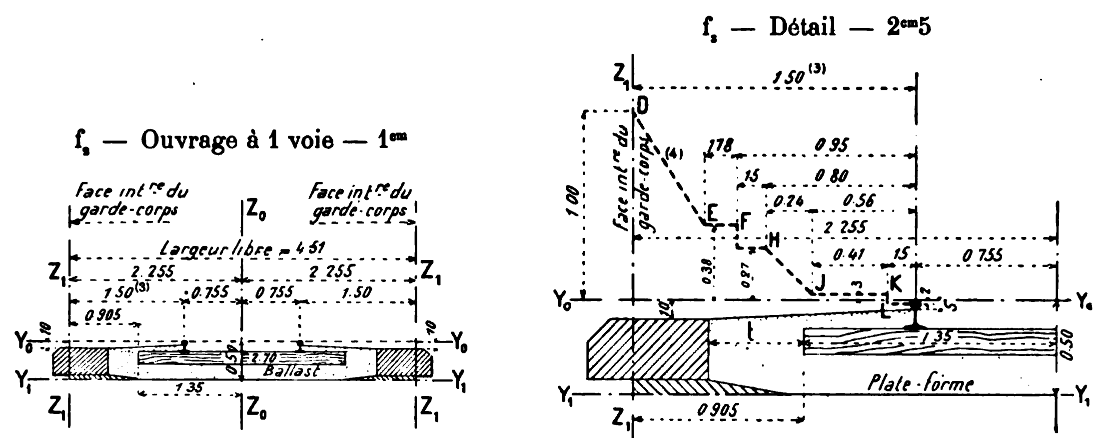
La largeur libre minima entre les faces intérieures des garde-corps est :
Pour les ouvrages à 2 voies (f_1, f_3) .... 8m08[1];
Pour les ouvrages à 1 voie (f_2, f_3) .... 4m51[2].

f_1 — Ouvrage à 2 voies — 1cm



f_3 — Détail — 2cm5

f_2 — Ouvrage à 1 voie — 1cm



1. — Au lieu de 8m (Cahier des charges des grandes Cies, art. 11).

2. — Au lieu de 4m50 (Cahier des charges du P-L-M et de l'Orléans, art. 11).

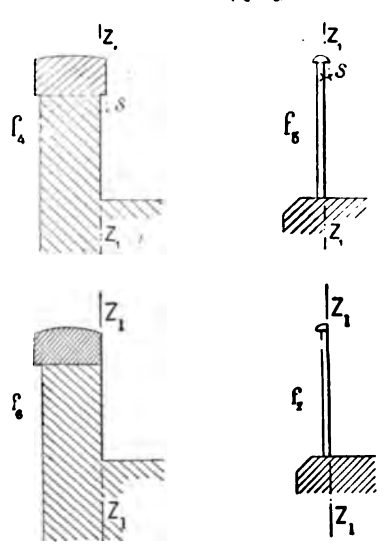
3. — Règlement ministériel du 8 Janvier 1915 pour les ponts métalliques, art. 27).

4. — — id — Rien ne doit dépasser la ligne brisée LKJHFED (f_3).

5. — Cahier des charges des grandes Cies, art 7.

Art. 3. — Pas de saillie du bahut ou de la lisse supérieure, sur la face intérieure du garde-corps.

Toute saillie s (f_4, f_5) sur la face intérieure des gardes-corps élargit l'ouvrage de $2s$.



Un encorbellement, disposé pour la regagner, sera bien mieux employé à réduire la largeur entre tympans.

Rien ne doit faire saillie sur le plan vertical $Z_1 Z_1$ (f_4 à f_7) : ni le bahut d'un parapet en maçonnerie, ni, dans un garde-corps métallique, la main courante, les pontets en fonte....

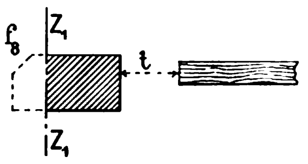
Peuvent toutefois faire saillie sur $Z_1 Z_1$ dans les garde-corps métalliques :

1° les renforts des montants (f_{10}) parce qu'ils n'empiètent pas sur le gabarit de construction (f_2) ;

2° les pilastres en fonte, parce que ce sont des obstacles isolés à plus de 1m35 du bord du rail voisin.[6]

Art. 4. — Distance minima t entre l'about des traverses et la face postérieure de la plinthe (f_8).

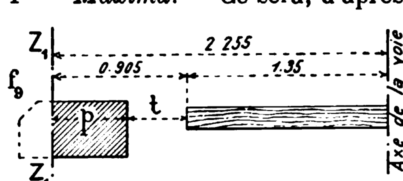
Elle est seulement de 0m155 le long des trottoirs des gares.



Admettons que la distance minima, pour éviter aux plinthes des chocs au passage des trains, soit 0m305[7, 8].

Art. 5. — Largeur p de la plinthe en dedans de la face intérieure du garde-corps $Z_1 Z_1$ (f_9).

1° — *Maxima.* — Ce sera, d'après l'art. 4:



0m905 — 0m305 (minimum de t) = 0m60[9]

0m60 n'est justifié que pour équilibrer un grand porte-à-faux: on ne l'a guère dépassé.

2°. — *Minima.* — La plinthe, en dedans du plan $Z_1 Z_1$, doit être assez large pour :

a — servir de trottoir aux Agents de la Voie. 0m35 suffit à la rigueur[10] : on a souvent pris 0m45.

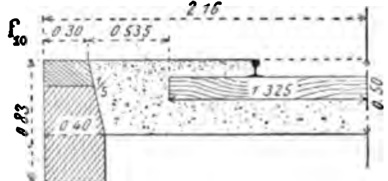
b — faire équilibre au porte-à-faux de la plinthe en avant du tympan.

Entre 0m35 et 0m60, on réduit p à ce qu'il faut pour la stabilité de la plinthe.

Art. 6. — Niches de refuge. Largeur. Profondeur. Place (f_{11}).

Tous les 50m environ de chaque côté de l'axe, soit de 25m en 25m en quinconce, on ménage des niches de refuge de largeur $l \geqslant$ 1m50, de profondeur $c \geqslant$ 0m30. Avec 0m30, un gros homme est à l'abri.

6 — Décision ministérielle du 31 décembre 1890 fixant la distance entre le rail et les obstacles isolés le long des voies principales.



7 — Elle est de : 0m365 aux viaducs de la nouvelle ligne de Paris à Chartres (Etat 1910).

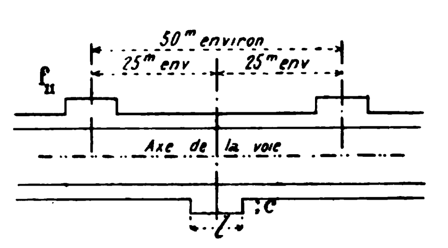
0m355 (traverses de 2m60) au viaduc de Thil ligne de Briey à Hussigny et Villerupt (Est 1905).

8 — Le ballast pousse peu la plinthe.

Sur des lignes du Midi en tranchée de rocher, on le maintenait par une murette de 0m30 en couronne (f_{10}).

9 — Viaducs de la ligne de Vendes à Mauriac (1888).

10 — A côté d'un parapet en maçonnerie de 1m de hauteur, on s'est contenté de 0m22 au viaduc du Blanc (Ligne de Poitiers au Blanc — 1881-85).



On prendra :

$c = 0^m35$ avec un garde-corps métallique ;

$c = 0^m30$ avec un parapet en maçonnerie, qui est lourd et dont il importe de réduire le porte-à-faux.

Suivant la portée des arches, on peut ne mettre de niches qu'à une pile sur deux, sur trois....

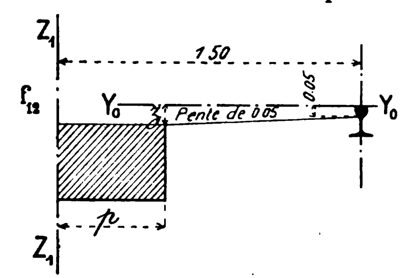
C'est l'aspect qui règlera la largeur l au-dessus du minimum de 1^m50, d'après l'ouverture des arches, l'épaisseur des piles, suivant que les tympans sont ou ne sont pas élégis.

Les niches seront toujours au-dessus des piles, jamais au-dessus des clefs des grandes voûtes.

Quand des voûtes d'élégissement traversent les tympans, on continuera à placer les niches au-dessus des grandes piles : elles y sont moins désagréables qu'à la clef des grandes voûtes.

Art. 7. — Dessus des plinthes à 0m10 plus bas que le rail voisin (f_{12}).

Le ballast descend en pente de 0,05 à partir d'un plan passant à 0^m05 au-dessous du plan supérieur des rails Y_0 Y_0.



Le dessus de la plinthe est au-dessous de Y_0 Y_0 de :

$z = 0^m05 + 0{,}05\,(1^m50 - p) = 0^m125 - 0{,}05\,p.$

p est généralement 0^m50. Alors $z = 0{,}10$; il est exceptionnellement (maximum) 0^m60 ; alors $z = 0^m095$.

On arasera toujours la plinthe à 0^m10 au-dessous du rail.

CHAPITRE II

RECONNAISSANCE DU SOL DE FONDATION A L'EMPLACEMENT DU VIADUC

Art. 1. — Quand doit-on faire les sondages ?

A temps pour changer le tracé, si on rencontre de trop mauvais terrains.

Art. 2. — Puits de sondage.

C'est par des puits qu'on reconnaît le mieux le sol : on le voit, on le touche, on l'éprouve.[11]

11. — Dans les terrains argileux, mouillés, la surface est une bouillie sans consistance: il ne faut pas s'en effrayer.

Au pont de Peseux, sur le Doubs, fondé à l'air comprimé sur de la marne argileuse, on enfonçait dans cette marne des cubes de 0^m30 de côté à l'aide de vérins pressant contre le plafond de la chambre de travail. (Il ne faut pas opérer sur de petits cubes, qui s'enfoncent tout de suite parce que la terre se soulève tout autour).

Voici ce qu'on a constaté:

Enfoncement en centimètres	Charge par $\overline{0^m01}^2$			
	Culée Lons-le-Saulnier	Pile 1	Pile 2	Culée St Jean-de-Losne
0	1^k94	3^k10	3^k55	3^k
1	3.61	4.60	4.10	4.44
2	4.50	5.70	4.75	5.77
3	4.83	6.80	5 20	7.00
4	5.17	8.50	5.55	8.00
5	5.72	9.60	6.30	9.10

L'ouvrage (métallique) terminé et surchargé, ne pèse pas plus de 5^k5 par $\overline{0^m01}^2$.

Sous l'ouvrage achevé, le sol ne peut pas refluer latéralement parce qu'il est maintenu par le poids des couches supérieures; la pression est réduite par le frottement latéral des massifs de fondation.

Sans doute, l'essai ne dure que quelques minutes et l'ouvrage, lui, pèsera indéfiniment; l'expérience montre que l'on peut conclure de l'un à l'autre.

Si on ne peut pas les foncer par épuisements, on descendra à l'air comprimé[12] un petit caisson en tôle.

Les puits seront, en général, creusés à côté des fondations et non à leur emplacement même, car, comme d'ordinaire ils descendent plus bas, il faut les boucher, ce qui est une dépense inutile ; de plus, dans les terrains un peu compressibles, les maçonneries qui les remplissent forment, sous les massifs de fondation, des points durs qui peuvent les faire casser[13].

Art. 3. — Sondages à la tige.

Quand le sol de fondation est trop bas ou quand il y a trop d'eau, on fait peu de puits parce qu'ils coûtent cher : on achève de le reconnaître par des sondages à la tige dans des tubes en tôle[14].

Ils n'indiquent guère que l'épaisseur et la nature des couches ; ils renseignent mal sur la quantité d'eau, assez peu sur la résistance[15], surtout des sols argileux[16].

Art. 4. — Nombre et profondeur des sondages.

Il en faut assez, et assez poussés :

1° pour bien définir la nature du terrain sur toute la surface de chaque fondation : le rocher rencontré au milieu peut disparaître sur une partie de la fouille[17] ;

2° pour représenter sur la coupe en long de l'ouvrage, par des lignes continues, les différentes couches ; quand on fonde par épuisements, il ne faut pas se tromper sur la position

12

Pont	Ligne de	Date	Caissons			Profondeur	Terrains traversés	Prix		
			Nombre	Forme	Dimensions ou diamètre			Total	par m. c[t] de descente	par m. c. du volume occupé par les caissons
de Caronte	Miramas à l'Estaque	1904	3	rectangul[res]	2^m×2^{m}50	18^{m}40 20.40 23.76	vase, argile molle, sablon	74624 fr.	1192 fr.	238 fr. 56
du Marais de S[te]-Marie	Frasne à Vallorbe	1911	1	rond	3^m	27.60	vase molle	51193 fr.	1855 fr.	262 fr. 40*
du Prégo-Diéu sur la Durance	Chorges à Barcelonnette	1912	2	ronds	3^m	29.30 30.40	sable, graviers, galets	62670 fr.	1050 fr.	148 fr. 48

* Pour 195^{mc} occupés par le caisson, on a deblayé 542^{mc}.

13. — Dit pour les ouvrages de 8^m et au-dessous (p. 27).

14. — Sondages de 0^{m}21 — Vallée de la Garonne (Ligne de Marmande à Casteljaloux) — 28 sondages — longueur cumulée 451^m (1879) — Prix moyen du mètre courant : dans la terre et sable 26 fr. 58 ; dans les graviers et galets 97 fr. 85 ; dans le « tuf » 64 fr. 62 — en moyenne 65 fr. 65 (Annales des Ponts et Chaussées — février 1883, p. 174).

Au pont de S[t]-Loup sur l'Allier (Ligne de Gannat à La Ferté-Hauterive), profondeur de 4^{m}52 à 33^{m}22 — longueur cumulée 275^{m}38 (1907) — 70 fr. le mètre courant.

15 — On a essayé de s'en rendre compte d'après le nombre de coups de trépan produisant un enfoncement donné.

Terrain traversé | Enfoncement par n coups de trépan | Nombre de coups de trépan
A Tendre
B Mou
C Assez dur
D Très dur
f_{13}

Au pont d'Orléans, (III, p. 255) on traçait une courbe dont les ordonnées étaient les profondeurs, et les abscisses les nombres totaux de coups de trépan depuis le commencement du sondage : la courbe se couche dans un terrain dur, se redresse dans un terrain mou. (f_{13}).

On peut aussi (f_{13}) indiquer par un trait l'enfoncement correspondant à une volée de 50 coups, de 20 coups. Plus les traits sont rapprochés, plus le terrain est dur. Annales des Ponts et Chaussées, octobre 1893. *Notice sur la Construction d'un viaduc à la traversée du Val de la Loire à Gien* (Ligne de Bourges à Gien) M. Rossignol.

16 — Dans ces sols, le trépan fait une bouillie de terrains souvent suffisamment solides, et on n'amène au jour qu'une boue liquide.

17 — Au viaduc des Crottes (Ligne de Morbier à Morez), deux piles se sont trouvées en porte-à-faux sur la tranche d'un feuillet calcaire relevé verticalement.

(Voir plus loin, renvoi 73, f_{60}).

du sol de fondation : on n'est outillé que pour les profondeurs présumées et on est exposé à ne plus pouvoir épuiser, si on descend plus bas;

3°. — pour être sûr que la couche de fondation peut porter l'ouvrage et savoir ce qu'il y a dessous.

Les sondages faits à la barre à mine au fond d'une fouille n'y suffisent nullement. On s'assurera donc à l'avance qu'on n'est pas sur une croûte mince cachant une couche compressible[18]; sur un pavage de gros blocs avec de la vase dessous[19]; sur un gros bloc isolé; que dans le rocher calcaire, il n'y a pas de cavernes[20]; que, dans le granit, il n'y a pas de plan de glissement[21]....

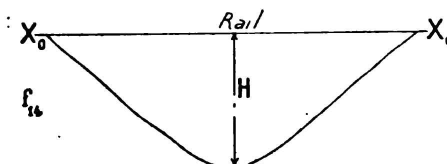
Si on est dans la marne ou dans l'argile, où les sondages ne sont pas chers, on les descendra bien au-delà du niveau probable de la fondation[22].

CHAPITRE III

PREMIÈRES INDICATIONS GÉNÉRALES POUR FIXER L'OUVERTURE ET LE NOMBRE DES ARCHES ET DESSINER UNE SILHOUETTE APPROCHÉE DE L'ÉLÉVATION

Art. 1. — Ouverture commune des arches, $2a$.

Soit H la hauteur du rail au-dessus du point le plus creux de la vallée (f_{14}) sur la face aval du viaduc.



On adoptera pour l'ouverture commune des arches :

$$2\,a = 0{,}4\ \mathrm{H}$$

C'est la proportion des beaux viaducs.[23]

18. — Au viaduc de la Gagne (Ligne du Puy à Langogne), les premiers sondages s'étaient arrêtés à une dalle de basalte. Or elle n'avait que 2^{m} d'épaisseur et reposait sur une couche indéfinie d'argile; elle ne couvrait même pas toute la fouille. On a dû renoncer au viaduc en maçonnerie projeté et accepter une travée métallique de 57^{m}, au grand dommage de l'aspect.

19. — Pont sur le Verdon, à Fontgaillarde (Basses-Alpes, — Ligne de St-André à Puget-Théniers).

20. — Pont de Beynac sur la Dordogne (Ligne de Saint-Denis au Buisson, 5 arches de 24^{m}). On trouva, à l'emplacement d'une pile, sous une croûte rocheuse de $0^{m}20$ à $0^{m}70$, un vide ayant jusqu'à 1^{m}. (Annales des Ponts et Chaussées, mars 1881) : *Fondations à l'air libre et à l'air comprimé*, M. Liébeaux).

Pont de Mareuil sur la Dordogne (Ligne de Cahors à Brive, — 7 arches de 23^{m} fondées à l'air comprimé). — En sondant à la barre à mine le rocher de fondation de la pile 2, on découvrit une cavité de 2^{m} à $2^{m}50$ de profondeur, dépassant la pile à l'amont et à l'aval. (Compte-rendu des Travaux p. 26).

Au vieux pont d'Orléans, en novembre 1758, à la 7e pile, il y eut un affaissement $0^{m}50$.

Au pont du Chemin de fer à Orléans (Ligne d'Orléans à Vierzon, — arches de $24^{m}20$ en anse de panier au 1/3), les tassements atteignirent $0^{m}736$. (Revue Générale des Chemins de fer, mars 1890, p. 131: *Note sur la reconstruction d'une pile du pont sur la Loire, à Orléans*, M. Grippon-Lamothe) ;

Au viaduc du Blanc, sur la Creuse (Ligne de Poitiers au Blanc), on a trouvé sous la pile 13 un trou de plus de 20^{m}. Au fond, on a battu des pieux; puis, dessus, coulé du béton.

21. — Au grand viaduc des Fades sur la Sioule (Ligne de St-Eloy à Pauniat), le coteau rive gauche, sous la charge de la culée et de ses 1/4 de cône, a glissé sur un mince lit d'argile qui coupait le granit à quelque 35^{m} de profondeur.

22. — On a poussé: au pont de Marmande 7 sondages à plus de 27^{m} (Annales des Ponts et Chaussées, février 1883, p. 178); au viaduc de Prégo-Diéu sur la Durance (Ligne de Chorges à Barcelonnette), 3 à 40^{m}.

23

Viaduc	Ligne de	Dates	H	$2a$	$\frac{2a}{H}$
sur l'Aulne, près de Port-Launay	Nantes à Landerneau	1864-66	$49^{m}30$	22^{m}	0,44
de Pompadour	Brive - Limoges	1873-75	55^{m}	25^{m}	0,45
de St Laurent d'Olt	Séverac - Marvejols	1877-79	$52^{m}68$	20^{m}	0,38
du Piou			$46^{m}50$	20^{m}	0,43
de la Crueize	Marvejols - Neussargnes	1879-83	$63^{m}30$	25^{m}	0,39
de Mussy	La Clayette - Lamure	1892-95	60^{m}	25^{m}	0,41
de la Gascarie	Carmaux - Rodez	1894-97	$49^{m}10$	20^{m}	0,41
de Weissenbach	St Gall - Wattwil	1907-09	$61^{m}40$	25^{m}	0,41

Avec elle, sur vallées en V bien accentué, l'arche centrale n'est pas trop petite, les arches extrêmes ne sont pas trop grandes.

Mais quand le bas de la vallée est large, plat, il faut s'inquiéter surtout des arches du milieu et alors augmenter l'ouverture.

On l'augmentera si les fondations sont chères, s'il y a un grand creux à franchir.....

Il n'y a pas intérêt à prendre $2a$ sensiblement au-dessous de 0,4 H[24].

Pour les plus hauts viaducs, on n'a guère, jusqu'ici, dépassé 25m.[25, 26]

Art. 2. — Epaisseur de l'ouvrage. Niveau des clefs des intrados (f_{12}).

Au-dessous de l'horizontale du rail $X_0 X_0$, on portera verticalement :

$$h = 0^{m}95 + 0{,}19\ (1 + \sqrt{2a})$$ [27]

L'horizontale $X_3 X_3$ est la tangente au sommet des arches.

Art. 3. — Première valeur approchée de l'épaisseur des piles aux naissances.

On admettra provisoirement pour toutes les piles :

$$e_2 = 0{,}20\ (2a)$$

Art. 4. — Fruit provisoire des piles en élévation.

Au-dessous de l'horizontale des naissances, $X_4 X_4$, on profilera les piles :

d'abord verticalement sur 0m40 de hautr;

puis avec un fruit de 0,025 (1/40).

Art. 5. — Silhouette de l'élévation sur « calque ».

Avec ces éléments, et des ouvertures variant par mètre autour de 0,4 H, on dessine quelques silhouettes sur « calque ».

On a, auparavant, sur un profil en travers de la vallée à l'emplacement de l'ouvrage, indiqué les cours d'eau, les chemins, le sol de fondation, la plate-forme (ligne rouge).

Sur ce profil, on promène les silhouettes ; on place les piles de façon à les fonder facilement, à bien encadrer le creux, bien franchir la rivière, les chemins.

L'ouvrage doit être bien encadré par ses culées.

Il n'est pas bon que les quarts de cône aveuglent les dernières voûtes : tout au plus, peuvent-ils atteindre leurs naissances.

Au besoin, on augmente l'ouverture ; à l'extrême rigueur, on la diminue un peu.

Avec cette silhouette, on arrête : l'ouverture $2a$; le nombre d'arches ; et, à très peu de chose près, l'emplacement des piles et des culées.

24. — Les ouvertures sont trop petites au viaduc d'Arquejols (Ligne de Langogne au Puy): $\frac{2a}{H} = \frac{15^m}{45} = 0{,}33$.

A celui du Landwasser (Chemins de fer rhétiques), pour $H = 66^m$, on a pris $2a = 20^m$ seulement, mais parce qu'il est en courbe de 100m.

25. — A Saint-Florent (Issoudun à Saint-Florent), la portée est de 30m, mais la hauteur n'est que de 24m70 ; c'est plus un pont qu'un viaduc.

26. — Nous avons projeté le viaduc de Chanteloube, haut de 65m, avec des arches de 27m (Chorges à Barcelonnette).

Sur la ligne à voie étroite de Bevers à Schuls (Chemins Rhétiques Engadine), le viaduc sur le val Püzza a 4 arches de 27m, une hauteur de 53m.

27. — Le produit $\alpha(1+\sqrt{2a})$ est donné, 3e Partie, Table T_1, pour $2a$ de 0m60 à 100m, et α de 0,10 à 0,25.

COURONNEMENT

§ I. — *PARAPETS*

Art. 1. — Parapets en maçonnerie.

Les premiers, et la plupart des très grands viaducs de chemins de fer, ont des parapets en maçonnerie.

A. — Ils sont chers.

Ils sont chers, surtout parce qu'ils augmentent la largeur entre tympans.[28]
Un mince garde-corps en métal est d'autant plus économique que l'ouvrage est plus haut.

B. — Plus de parapets pleins.

Les parapets pleins sont lourds : ils écrasent un viaduc qui doit être élancé, ils le font ressembler à un pont-canal.

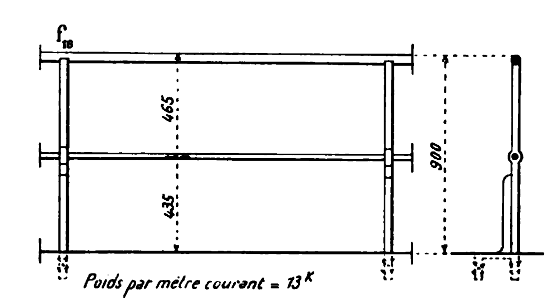
La plinthe, entre deux surfaces pleines, le tympan et le fût, c'est-à-dire entre deux parements d'aspect peu différent, n'a plus d'autre rôle apparent que d'indiquer à l'œil où est la voie : ce n'est pas assez pour la justifier.

Sur une plinthe, il faut un attique léger, un parapet ajouré : dans nos cathédrales, on ne voit pas de parapet plein au-dessus d'une corniche.

On ne construira donc pas de parapets pleins, mais des parapets ajourés, et seulement pour un très grand ouvrage dans une ville.

Art. 2. — Garde-corps métalliques.

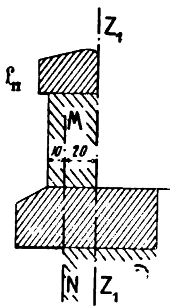
A. — En fer ou en acier.



Pour un petit viaduc entre deux murs de soutènement, on conservera le garde-corps des murs (f_{18}) avec des dés en libages au droit de chaque montant.

Sur le viaduc et les murs, on assurera discrètement le jeu de la dilatation.

28. — Soit MN le nu du tympan (f_{17}).



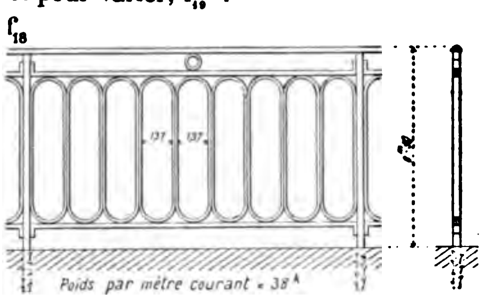
Pour un parapet en maçonnerie de $0^{m}30$ d'épaisseur, porté par une plinthe sans corbeaux, la distance entre Z_1 Z_1 et MN est d'environ $0^{m}20$.

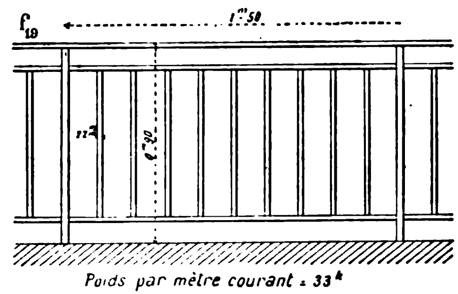
Avec un garde-corps métallique, qui n'a que $0^{m}05$ d'épaisseur (au lieu de $0^{m}30$), qui ne pèse que 30 ou 40^{k} au mètre courant (au lieu de 600 ou 700^{k}), on peut faire coïncider les plans MN et Z_1 Z_1, et même faire déborder un peu le plan Z_1 Z_1 par rapport au plan MN.

On gagne donc au moins $0^{m}20$ à chaque tête, soit en tout $0^{m}40$ de largeur pour toute l'élévation de l'ouvrage.

Sur un viaduc comme celui de Port-Launay, qui a en élévation une surface de plein de 4570^{mq}, c'est une économie de cube de 1828^{mc}, soit, à 40 fr. le mc., 73.120 fr.

S'il n'y a pas de murs aux abords, on appliquera sur les viaducs courants le type f_{18}; à défaut et pour varier, f_{19}[29].





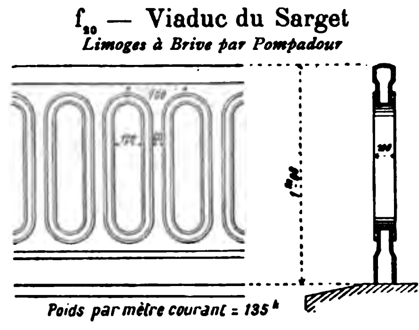
Dans les gares et aux abords, à moins de 200m en avant et 150m en arrière du milieu des trottoirs, la hauteur du garde-corps sera portée à 1m.

Pour les viaducs exceptionnels, on étudiera des types spéciaux[30].

A ces garde-corps ténus, on a fait ce reproche qu'à distance, un ouvrage ne paraît pas couronné du tout: tout compte fait, est-il si nécessaire qu'on voie quelque chose au-dessus de la corniche? A de belles églises romanes, il n'y a rien, et c'est fort bien.

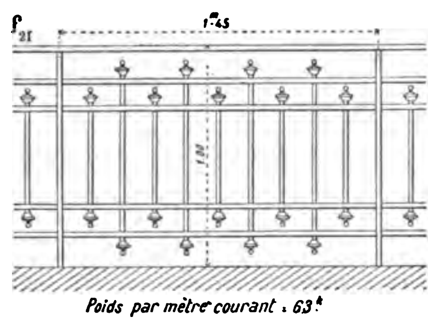
B. — En fonte.

f_{20} — Viaduc du Sarget
Limoges à Brive par Pompadour



Sur des ouvrages très ornés, il pourra quelquefois convenir de placer des garde-corps en fonte, bien étoffés, — mais ils sont chers[31].

Les évidements f_{20}, un temps fort employés, sont ennuyeux.



f_{22}

29. — En mars 1913, on pouvait admettre :

Type	Prix du kilog.	Prix du m. c'
f_{16}	0 fr. 50	6 fr. 50
f_{18}	0 fr. 56	21 fr. 28
f_{19}	0 fr. 52	32 fr. 76

30. — On a appliqué f_{21} au Pont de Saint-Loup, sur l'Allier (La Ferté-Hauterive à Gannat).

31. — Voici (f_{22}) celui du pont en construction à Abrest, près de Vichy (ligne de Riom à Vichy): il pèse par m. c' 180k.

§ 2. — *LARGEUR ENTRE TYMPANS.* (*garde-corps en métal*)

4m50 pour une voie; 8m08 pour deux voies, - largeur comptée au niveau de la plate-forme, c'est-à-dire à 0m50 en contrebas du plan supérieur des rails.

A titre exceptionnel, on pourra mettre en encorbellement le garde-corps sur des corbeaux, ancrés au besoin[32] sur une sous-plinthe[33], sur des consoles en béton armé[34]. Si le viaduc est haut, on fait ainsi une grosse économie.

§ 3. — *PLINTHE*

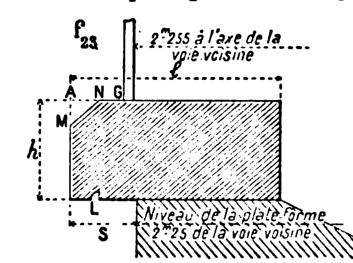
Art. 1. — Epaisseur h (f_{23}).

L'épaisseur de la plinthe varie avec l'importance, la hauteur, les ouvertures, le caractère de l'ouvrage.

Il faut une plinthe épaisse sur les viaducs très hauts, pour qu'on la voie, — et aussi sur les viaducs bas à grandes arches, parce que ce sont des ouvrages lourds.

Art. 2. — Saillie S (f_{23}).

Elle protège contre la pluie les têtes de l'ouvrage ; elle doit donc croître avec leur fruit.



Quand elle est trop faible, la pluie les verdit, les noircit à partir de l'aplomb de la plinthe.

On augmentera la saillie, si l'on veut sous le couronnement une large ligne d'ombre.

Il faut au moins 0m20 ; mieux 0m25.

On creuse en dessous un larmier L pour empêcher les gouttes d'eau de ruisseler sur le tympan.

Art. 3. — Profil.

On le trace suivant le caractère de l'ouvrage, la dureté, l'épaisseur de la pierre.

On ne doit refouiller que des pierres tendres.

Art. 4. — Plinthes courantes sous garde-corps en métal.

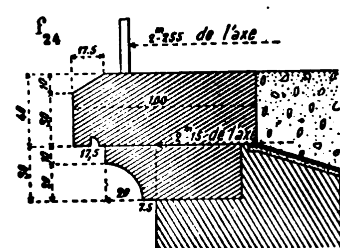
On adoptera le profil f_{23} et les dimensions que voici :

Hauteur maxima du viaduc H	Ouvertures des arches 2a	Dimensions de la plinthe (f_{23})				
					Chanfrein	
		Epaisseur h	Largeur l	Saillie S	Largeur AN	Hauteur AM
Jusqu'à 20m	Jusqu'à 8m (inclus)	0m30	0m70	0m25	0m15	0m075
De 20 à 25m	De 8 à 10m (inclus)	0.35	0.75	0.275	0.17	0.085
De 25m à 37m50	De 10 à 15m (inclus)	0.40	0.80	0.30	0.20	0.10
De 37m50 à 50m	De 15 à 20m (inclus)	0.45	0.90	0.35	0.22	0.11

NG sera toujours d'au moins 0m05, pour qu'on scelle les montants en deçà de l'arête.

Si le garde-corps avait plus de 0m045 d'épaisseur, on conserverait NG à 0,05 et on diminuerait AN.

32. — Au viaduc à voie normale de l'Oued Beja (Tunisie), la largeur entre tympans est réduite à 4m.



33. — Viaduc de Chanteloube (Chorges à Barcelonnette) — Projet, f_{24}, f_{25}, — Hauteur, 61m. Largeur entre têtes, 4m30.

34. — On a réduit la largeur entre tympans à 2m50 au Viaduc de Fontpédrouse, V, p. 87 (Ligne électrique à voie de 1m), — à 2m, aux ouvrages de la ligne à voie de 1m de la Vouga (Portugal).

On a donné 4m20 seulement aux ouvrages sous voie normale de Montrejeau à Bagnères-de-Luchon.

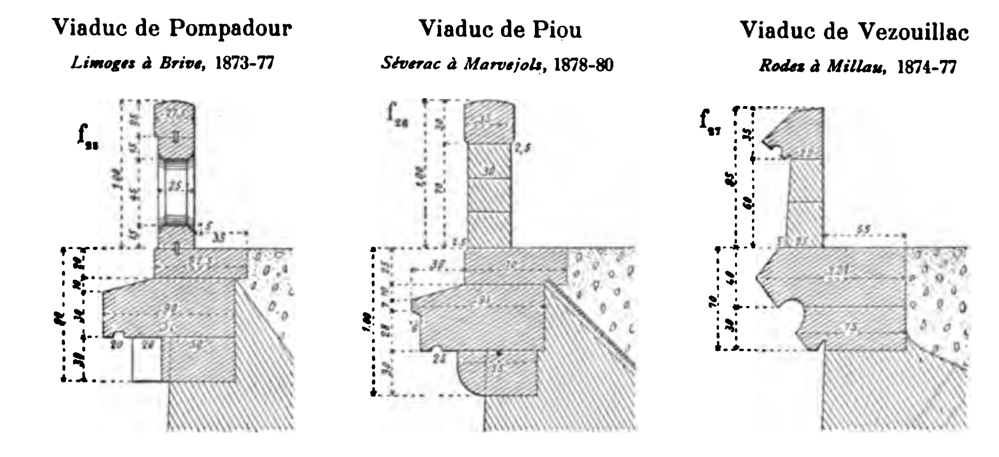
Grâce à des consoles en béton armé, la Cie d'Orléans a placé : 3 voies, dont une de 1m, (en tout 4m de voie), sur le viaduc de Saint-Florent de 8m30 entre têtes (Ligne d'Issoudun à St-Florent); — 3 voies, dont les deux de sa grande ligne, (soit 4m50 de voie), sur le pont sur l'Isle de la gare de Coutras, qui a 8m45 entre tympans.

Art. 5. — Quelques profils un peu exceptionnels de corniches[35].

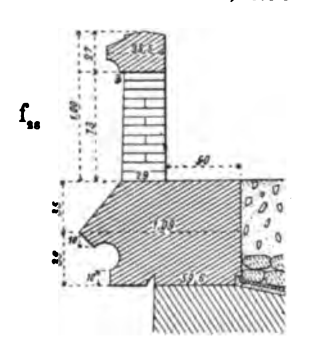
Viaduc de Pompadour — *Limoges à Brive*, 1873-77

Viaduc de Piou — *Séverac à Marvejols*, 1878-80

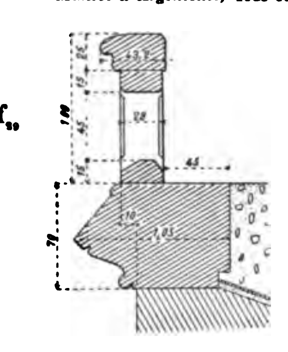
Viaduc de Vezouillac — *Rodez à Millau*, 1874-77



Pont de St-Waast — *Montauban à Castres*, 1883-85



Viaduc sur le bras navigable de la Seine — *Mantes à Argenteuil*, 1888-89



A l'imitation des églises romanes d'Auvergne, on placerait heureusement des corniches sur corbeaux ; je dis des corbeaux, et non de menus modillons comme ceux de f_{25}.

f_{27} est emprunté à nos cathédrales du XIIIe siècle.[36, 37]

§ 4. — *NICHES DE REFUGE. — LEURS PARAPETS, LEURS SUPPORTS*

Dans un parapet plein, niches pleines ; — dans un parapet à jours, une niche pleine ne se comprend que pour couronner un contrefort, — et encore à condition que le parapet courant ait assez de pleins. Si non, de loin, on ne voit que les rectangles pleins des niches.

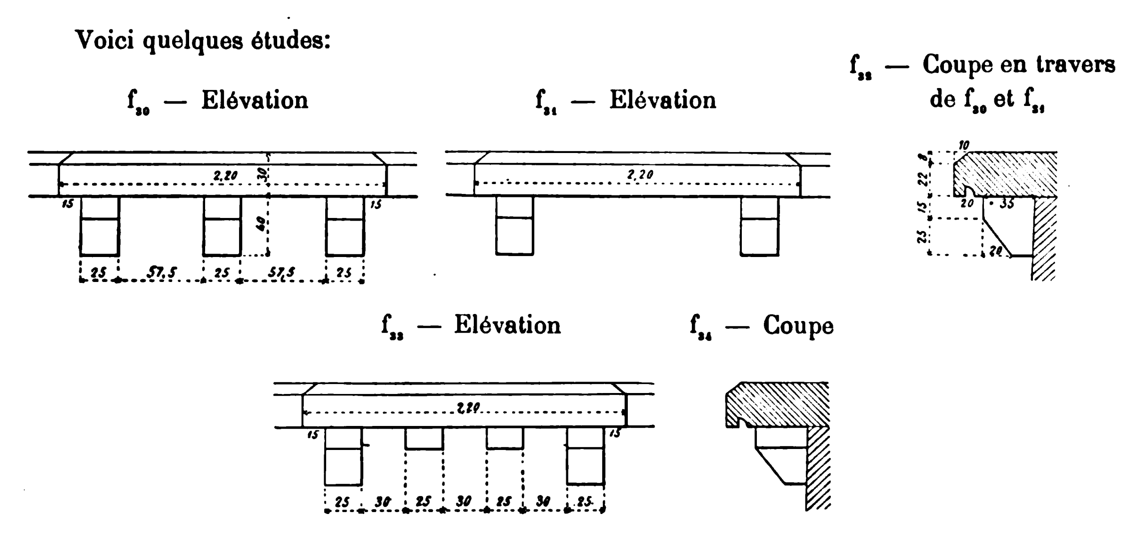
Sur nos viaducs, qui n'ont pas de contreforts, les niches doivent être discrètes, presque dissimulées, avoir le garde-corps courant, reposer sur deux ou trois corbeaux.

35. — Voir les couronnements des ponts du Castelet (II, p. 131, f_8), de Lavaur (II, p. 137, f_{13} à f_{16}), Antoinette (II, p. 145, f_8, f_{11}).

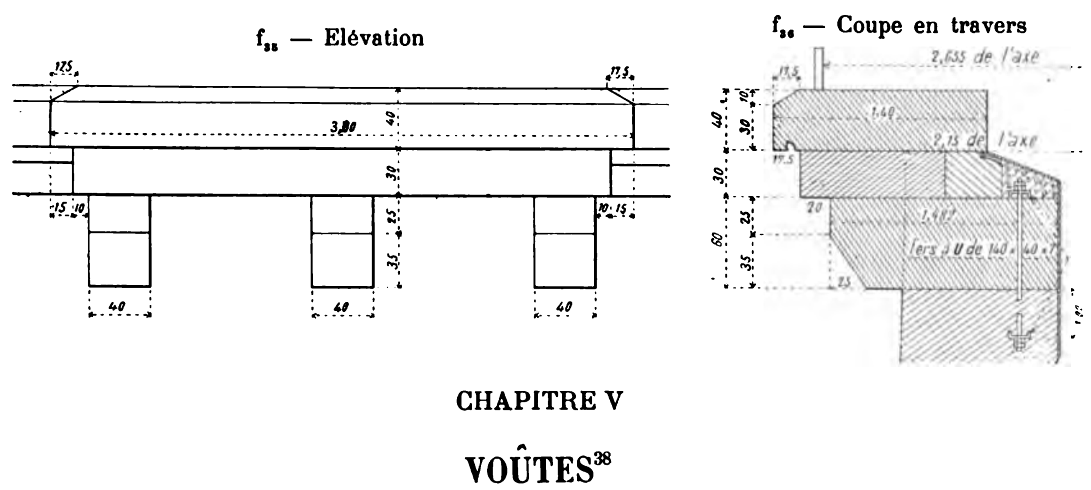
36. — M. Robaglia, alors Ingénieur en chef des Ponts et Chaussées, a ainsi couronné de grands viaducs de l'Aveyron et de la Lozère. C'est d'un bon effet, mais cher si la pierre est dure.

37. — On a posé ces plinthes gothiques sur de petits ouvrages, même sur des culées de ponts métalliques : c'est abuser.

Voici quelques études:



Refuge au-dessus d'une pile de 4^m d'épaisseur
Projet du Viaduc de Chanteloube *(Chorges à Barcelonnette)*



CHAPITRE V

VOÛTES[38]

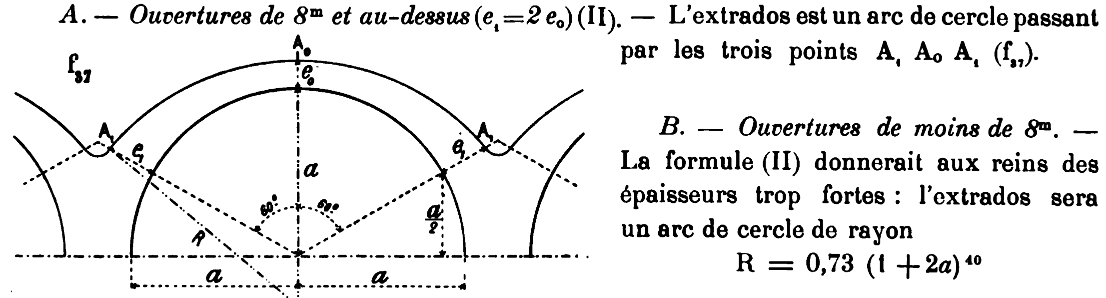
§ I. — *CORPS*

Art. 1. — Epaisseur à la clef: $e_0 = 0,19\,(1+\sqrt{2a})$ (I)

A nombre de viaducs, on a, au lieu de 0,19 adopté 0,18 et même moins.[39] Pour tenir compte du poids et de la vitesse croissants des machines, il a paru prudent, — dans une Instruction sur les viaducs courants, — d'adopter 0,19.

Art. 2. — Epaisseur e_1 au milieu de la montée et tracé de l'extrados.

A. — Ouvertures de 8^m et au-dessus ($e_1 = 2\,e_0$) (II). — L'extrados est un arc de cercle passant par les trois points A_1 A_0 A_1 (f_{37}).



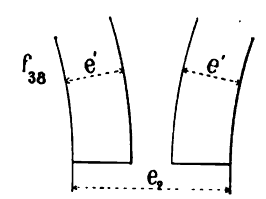
B. — Ouvertures de moins de 8^m. — La formule (II) donnerait aux reins des épaisseurs trop fortes : l'extrados sera un arc de cercle de rayon

$$R = 0,73\,(1 + 2a)$$ [40]

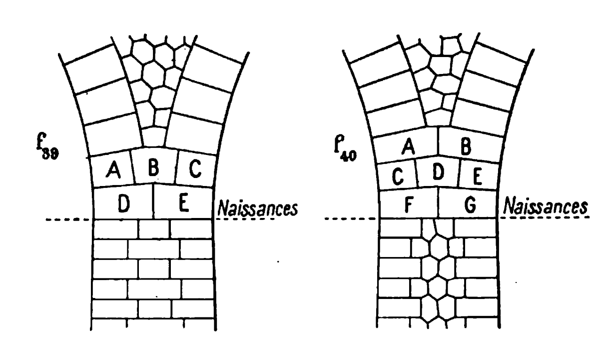
38. — Pour le mortier — chaux ou ciment — voir V p. 13. 39. — III, p. 386, 387, 388. 40. — Pour $2a \leqslant 8^m$, e_0, R, e_1, sont donnés p. 33.

§ 2. — *BANDEAUX*

Art. 1. — Epaisseur. Les bandeaux des viaducs à tympans pleins seront extradossés parallèlement, c'est-à-dire qu'ils auront une épaisseur constante *e'* très voisine de e_0.



En la réduisant, on fait une très petite économie, aux dépens de l'aspect : un bandeau mince est désagréable.



Il faut qu'aux naissances, entre les bandeaux de deux arches voisines, il y ait au moins 15cm, place d'un moellon :

$$e_2 \geqslant 2e' + 0^m15 \ (f_{38})$$

S'il n'en est pas ainsi, par exemple pour les petites portées ou pour des piles basses, on adoptera les dispositions des croquis f_{39} f_{40}.

Les pierres A, B, C, D, E, F, G, sont dans le plan du bandeau ; si le bandeau est en saillie, elles sont en saillie sur le tympan et sur la pile.

On indiquera plus loin[41] comment varie l'épaisseur aux naissances e_2 suivant la hauteur des piles : il en peut résulter quelque difficulté à appliquer la règle : $e_2 \geqslant 2e' + 0^m15$.

Si dans certains petits viaducs, il n'y a qu'aux plus hautes piles seulement un intervalle de 0m15 aux naissances entre les extrados des bandeaux, on fera au mieux pour l'aspect : par exemple, on adoptera f_{40} aux piles centrales ; on supprimera la saillie des bandeaux sur les tympans....

Art. 2. — Saillie. Le bandeau ne fera jamais saillie sur la douelle de la voûte.

Il sera en saillie de 3cm [42] sur la pile et sur le tympan: il y aura une petite ligne d'ombre sous ses naissances.

Sans doute, il est peu rationnel que, sur cette saillie, le bandeau ne soit pas soutenu; mais elle est fort utile pour le détacher des tympans, — pour qu'il ne s'y perde pas, surtout s'ils sont à bossages.

On pourra, toutefois, la supprimer pour les viaducs à arches de moins de 8m.

Il ne faut pas que le bandeau et la pile soient dans un même plan en saillie sur le tympan : le tympan a l'air de rentrer dans la pile, cela engonce l'ouvrage.

Art. 3. — Appareil. Il sera en moellons d'appareil (MAV.), et non en pierre de taille.

Leur épaisseur *h* sera voisine de 0m20 (au moins 0m18, — rarement plus de 0m22, — très exceptionnellement C m25).

41. — Chap. VI, § I.

42. — On a donné assez souvent 5cm c'est beaucoup; — le plus généralement 3cm aux plus petits viaducs et aux plus grands (Pompadour, Crueize....)

Afin d'éviter les carreaux, qui sont désagréables, on prendra au moins 1,5 h pour la longueur l dans le sens du rayon et pour la queue q dans le sens des génératrices de la douelle. (f_{41})

l ne devra, d'ailleurs, pas dépasser $3h$, soit en pratique 0m60.

Dans le sens du rayon, il n'y aura qu'un seul moellon pour les bandeaux d'une épaisseur de 0m60 et moins ; au-delà, il y aura deux, trois moellons.

La découpe d de deux moellons voisins, sur la face du bandeau comme en douelle, sera au moins $\frac{h}{2}$, soit au moins 0m10, le plus souvent 0m15, quelquefois 0m20.

Pour ne pas multiplier les échantillons, les dimensions seront en nombre rond de 5cm.

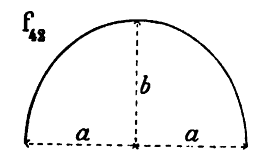
Voici l'appareil à adopter pour des moellons d'épaisseur voisine de 0m20 :

Ouverture des arches $2a$	Epaisseur de la voûte à la clef $e_{\circ}$	Epaisseur du bandeau e'	Moellons du bandeau — Nombre dans le sens du rayon	Moellons du bandeau — Longueur suivant le rayon l (f_{41})	Moellons du bandeau — Queue en douelle q (f_{41})
5m	0m61	0m50	1	0m50	0m30 — 0m40
6	0.66	0.55	1	0.55	0.30 — 0.40
7	0.69	0.60	1	0.60	0.35 — 0.50
8	0.73	0.70	2	0.40 — 0.30	0.35 — 0.50
9	0.76	0.75	2	0.45 — 0.30	0.30 — 0.45
10	0.79	0.75	2	0.45 — 0.30	0.30 — 0.45
11	0.82	0.80	2	0.45 — 0.35	0.35 — 0.45
12	0.85	0.85	2	0.50 — 0.35	0.35 — 0.50
13	0.88	0.85	2	0.50 — 0.35	0.35 — 0.50
14	0.90	0.90	2	0.50 — 0.40	0.40 — 0.50
15	0.93	0.90	2	0.50 — 0.40	0.40 — 0.50
16	0.95	0.95	2	0.55 — 0.40	0.40 — 0.55
17	0.97	0.95	2	0.55 — 0.40	0.40 — 0.55
18	1.00	1.00	2 ou 3	0.60 - 0.40 ou 0.30 - 0.30 - 0.40	0.40 — 0.60
19	1.02	1.00			0.40 — 0.55
20	1.04	1.05	2 ou 3	0.60 - 0.45 ou 0.30 - 0.30 - 0.45	0.45 — 0.60
21	1.06	1.05			0.45 — 0.60
22	1.08	1.10	3	0.30 — 0.30 — 0.50	0.45 — 0.60
23	1.10	1.10	3	0.30 — 0.30 — 0.50	0.45 — 0.60
24	1.12	1.15	3	0.35 — 0.35 — 0.45	0.45 — 0.60
25	1.14	1.15	3	0.35 — 0.35 — 0.45	0.45 — 0.60

§ 3. — *VOÛTES EN OVALE SURHAUSSÉ*

Un plein cintre vu de face, de bas, paraît surbaissé : pour l'élancer, on peut le surhausser légèrement,[43] tout en conservant sous les naissances, au sommet des piles, un petit élément vertical.[44]

On fera ainsi pour les très grands viaducs.



43. — Par exemple (f_{42}) : $2a$ = 20m b = 11m (au lieu de 10m).
$2a$ = 26m b = 14m (au lieu de 13m).
$2a$ = 27m b = 14m50 (au lieu de 13m50). Projet du viaduc de Chanteloube (Chorges à Barcelonnette) silhouette (f_{54}).

44. — Voir plus loin Chap. VI, § 2, art 1.

PILES

§ 1. — *ÉPAISSEURS DES PILES AUX NAISSANCES DES VOÛTES* e_2

Art. 1. — Piles à mortier de chaux.

A. — Portées de moins de 8m.

On a assez souvent pris $e_2 = 0{,}20\,(2a)$.

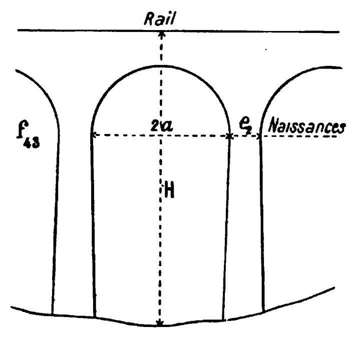
Pour les petites portées, c'est mince. Sur la largeur de la pile aux naissances, il n'y a que 3 ou 4 moellons. Sous les lourdes machines d'aujourd'hui, un défaut est plus dangereux qu'autrefois. Si donc on n'est pas assuré d'une exécution parfaite, on adoptera

pour $2a \leqslant 8^m$ au lieu de $0{,}20\,(2a)$,

$0{,}40 + 0{,}15\,(2a)$ et même $0{,}80 + 0{,}10\,(2a)$.

B. — Portées de 8m et plus.

Pour le rapport $\frac{e_2}{2a}$, on a à peu près toujours pris 0,2[45] et pour toutes les piles d'un même viaduc, quelle qu'en fût la hauteur (f_{43}).



Au poids mort, ou sous les surcharges recouvrant tout l'ouvrage, la pression au sommet d'une pile ne dépend évidemment pas de sa hauteur, mais seulement de la portée $2a$: la hauteur n'intervient que dans le cas de surcharges dissymétriques, une arche chargée, l'autre non.

Pour les piles les plus hautes des viaducs dont l'ouverture des arches est, en général, voisine des 4/10 de la hauteur totale, les épures de stabilité justifient ce rapport $\frac{e_2}{2a} = 0{,}2$.

Mais ce qui n'est pas rationnel, c'est de le conserver pour toutes les piles.

Pour les pleins-cintres bas, comme le sont généralement les arches extrêmes des viaducs, il est excessif de prendre $\frac{e_2}{2a} = 0{,}2$ comme dans les ponts d'avant Perronet[46].

Des rapports $\frac{e_2}{2a}$ et $\frac{H}{2a}$ à quelques bons ouvrages en plein cintre, on peut déduire la formule empirique[47] (f_{44}).

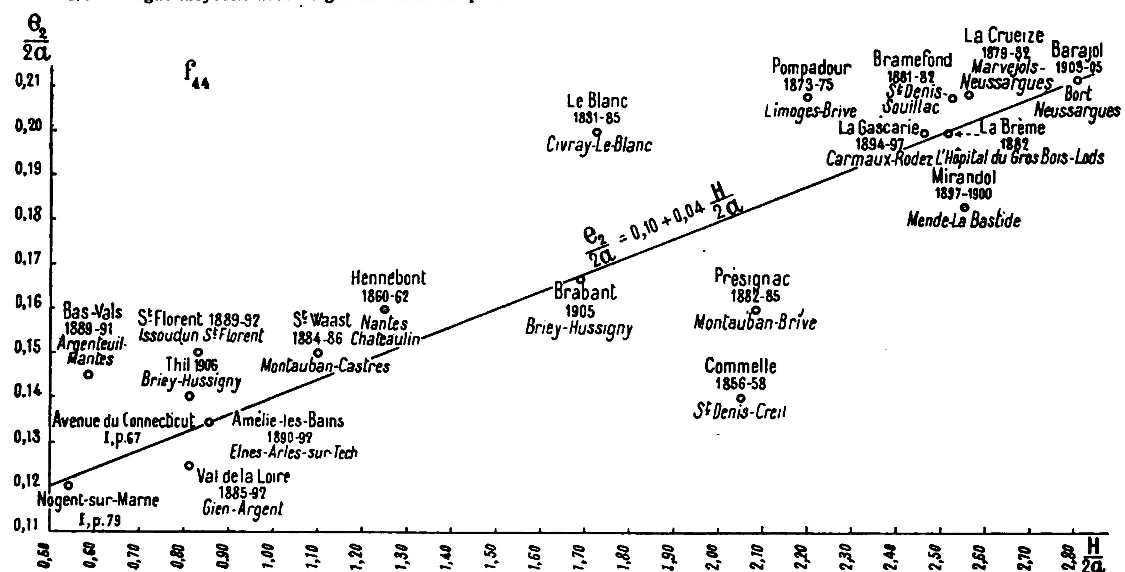
$$e_2 = \frac{2a}{10} + 0{,}04\ H$$

(H, hauteur entre le rail et le terrain à l'aval de la pile).

45. — On fait une grosse économie en réduisant $\frac{e_2}{2a}$: on est descendu à 0,16 au viaduc de Cize sur l'Ain, arches de 20m, mais il est à 2 étages (Ligne de Bourg à Bellegarde par la Cluse). J'ai adopté 0,183 au viaduc de Mirandol (Ligne de Mende à La Bastide). Dans nombre de viaducs italiens, on trouve $\frac{1}{6} = 0{,}167$.

46. — On adopte couramment $\frac{1}{8}$ pour les ponts en ellipse, $\frac{1}{8}$ à $\frac{1}{10}$ pour les ponts en arc (V, p. 31).

47. — Ligne moyenne avec de grands écarts de part et d'autre.



On majore au besoin ce qu'elle donne, de façon qu'il n'y ait pas entre 2 piles voisines de différences d'épaisseur choquantes.

Si dans des piles ainsi définies, on calcule les efforts par les méthodes Culmann-Ritter[48], on trouve que, sous les surcharges dissymétriques, les piles basses travaillent plus que les hautes, plus flexibles : ces méthodes justifieraient plutôt

$$0{,}25a + 0{,}03\mathrm{H} \quad \text{et même} \quad 0{,}30a + 0{,}02\mathrm{H}.$$

Mais elles supposent que les piles aux naissances sont libres de se déplacer horizontalement, alors qu'elles en sont empêchées par les tympans.

Je ne sais pourquoi on n'a pas plus tôt fait varier e_2 avec H : l'aspect est meilleur, la dépense moindre[49].

La variation du rapport $\frac{e_2}{\mathrm{H}}$ n'est appréciable que sur le dessin ; elle ne l'est pas, et c'est ce qui importe, dans l'ouvrage : les piles les plus hautes paraîtront encore les plus minces.

De tout temps, on a fait varier l'épaisseur des supports avec leur hauteur : c'est ainsi que les Grecs réglaient, d'après le rayon des colonnes à leur pied (module), leur hauteur et leur espacement.

Quand la largeur des piles en élévation est inférieure à 1m50, il reste, entre la queue des moellons d'angle, trop peu de place pour y loger pratiquement des moellons à joints incertains ; on y mettra alors des moellons équarris par assises réglées prolongeant celles des moellons d'angle.

Dans un petit viaduc, il peut arriver qu'aux naissances les piles centrales aient plus de 1m50 de largeur, et les piles extrêmes moins de 1m50 : s'il convient de faire en moellons incertains les parements des grandes piles, on élargira les petites à 1m50.

Art. 2. — Piles à mortier de ciment.

On y admet un travail plus élevé, par conséquent une épaisseur moindre aux naissances et à toute hauteur [50, 51] : il n'y a pas encore assez d'exemples pour préciser [52, 53].

On la fixera d'après ce que peuvent porter les matériaux employés.

48. — Voir plus loin (2e Partie, Livre II).

49. — J'avais conseillé cette disposition en 1908, pour le viaduc de l'Oued Beja (Tunisie). Je l'ai adoptée aux viaducs de la ligne de Nice à Coni, en particulier à celui de l'Escarène (11 arches de 15m, hauteur maxima 39m) 1913-14 ; e_2 est de 3m au milieu et descend à 2m25, 2m30 pour les piles de rive ; l'écart maximum d'une pile à sa voisine est de 0m35.

50. — Au viaduc du Landwasser (hauteur 64m, arches de 20m, R = 100m), elle est de 3m50, soit 0,17 de la portée ; (pression sur le sol : 12k5).

Albula-Bahn-Denkschrift im Auftrage der Rhätischen Bahn zusammengestellt von Prof. Dr Hennings. — Coire et Zurich, 1908, p. 26, Pl. 15 et 18.

51. — Au viaduc de Weissenbach (hauteur 62m, arches de 25m), elle est de 3m50, soit 0,14 de la portée ; (pression sur le sol 11k7).
Au viaduc sur la Sitter (arches d'accès de 25m, au milieu, une travée métallique de 120m), une des piles-culées de 7m70 d'épaisseur aux naissances de la voûte d'accès, a une hauteur de 93m ; elle résiste, sans contre-poussée, à une arche de 25m. Sur le parement opposé, elle travaille à 25k.)

Bodensee-Toggenburg-Zürichsee, *Denkschrift über die Eisenbahn-Verbindung Romanshorn-St-Gallen-Wattwil-Uznach*, — St-Gall 1911 : Sitter, p. 82, Pl. 7 ; Weissenbach, p. 94, Pl. 8 et 9.

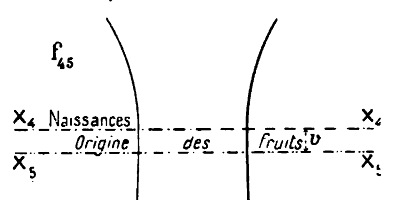
52. — Au viaduc de Malvan (hauteur 62m, arches de 22m), l'épaisseur aux naissances est seulement de 2m50, soit 0,114 de la portée ; mais c'est sous tramway (Ligne de Cagnes à Vence, — Alpes-Maritimes).

53. — A des viaducs projetés (Lignes de Chorges à Barcelonnette, du Puy à Nieigles-Prades), $\frac{e_2}{2a} = 0{,}15$.

§ 2. — *FRUIT DES PILES*

Art. 1. — Ménager sous les naissances, en élévation, un élément vertical.

Pour adoucir le raccordement des piles aux voûtes, on disposera sous les naissances, en élévation, un élément vertical :



$v = 0^m20 + \frac{2a}{100}$ avec la condition $v \geqslant 0^m40$.

On arrondira v, de façon à comprendre un nombre entier d'assises.

C'est au plan horizontal X_5X_5 (f_{45}) que commence le fruit en élévation.

Art. 2. — Comment on profile les piles.

On adopte[54] :

ou bien des fruits constants, avec un ressaut quand on atteint le travail limite ;

ou bien, pour les hauts viaducs, des fruits croissant avec la hauteur au-dessous des naissances ;

soit suivant des lignes brisées,

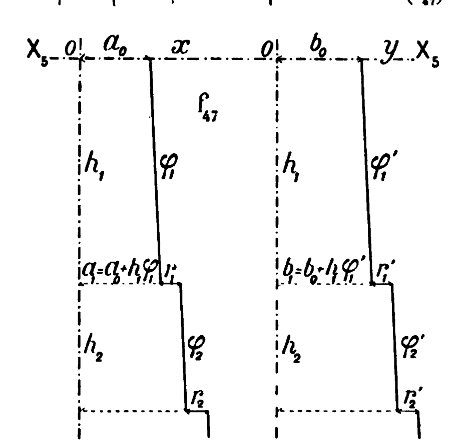
soit suivant des courbes continues.

Art. 3. — Fruits droits constants (f_{46}).

A. — En élévation. — On a admis au moins et le plus souvent 2^{cm}, au plus et moins souvent 3^{cm}, que l'œil accepte à peine. D'ailleurs, en forçant φ, on réduit trop le vide à la base.

B. — En travers. — Pour φ', on va de 2^{cm} à 5^{cm}.

C. — Ressauts. — Dans les hautes piles, on atteint la pression limite fort au-dessus du sol, par exemple à h_1 au-dessous des naissances (f_{47}).



On élargit alors la pile par un ressaut r_1 ; puis on repart avec le même fruit ou un plus grand, et on est obligé, si la pile est assez haute, à un deuxième ressaut r_2.

S'il n'y en a qu'un, et qu'il soit tout près du sol, il est comme le socle de la pile. C'est très acceptable. S'il est haut, il coupe fort désagréablement des lignes verticales qu'il faut respecter.

Deux ressauts sont choquants, comme on a le regret de le constater au beau viaduc de Pompadour (55^m de hauteur) : l'effet de hauteur en est fort amoindri.

54. — Les Romains dressaient verticalement les fûts des piles (Aqueduc de Ségovie). Reynaud a projeté ainsi le viaduc de Dinan, — exemple qui a été très peu suivi *(Traité d'Architecture. — Edifices,* p. 495, Pl. 71) : on en trouve de tels sur la ligne de Marseille à Avignon (avant 1847), par exemple :
le viaduc des Riaux près de l'Estaque (5 arches en plein cintre de 8^m, cordons aux naissances, bandeaux à crossettes);
le viaduc de la gare de Tarascon (61 arches dont 58 en plein cintre de 4^m d'ouverture, avec archivolte, cordons aux naissances). C'est un ouvrage romain : les Arènes de Nîmes, le pont du Gard sont tout près.

55. — Le volume de la tranche h_1 est :

$$V_1 = 4h_1\left[a_0 b_0 + (b_0\varphi_1 + a_0\varphi'_1)\frac{h_1}{2} + \varphi_1\varphi_1'\frac{h_1^2}{3}\right]$$

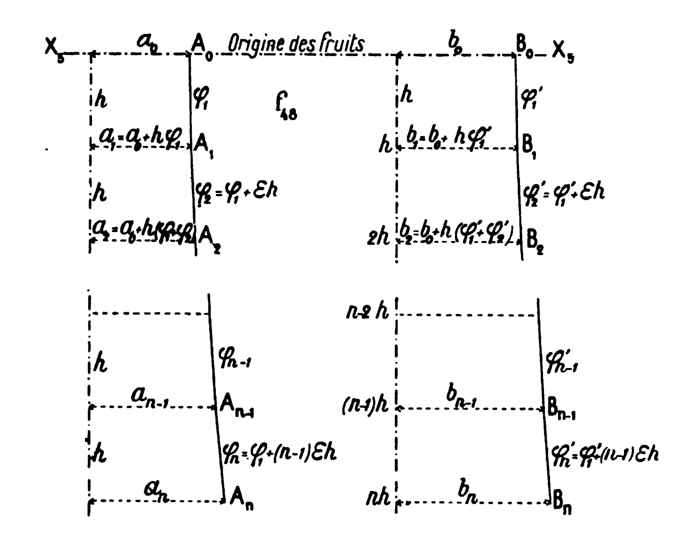
Il en eut fallu trois au viaduc de la Crueize (63m de hauteur).

Pour les très hauts viaducs, il faut donc faire varier les fruits.

Art. 4. — Fruits croissants. — Profils en ligne brisée (f_{48}).

Au-dessous du plan $X_5 X_5$, origine des fruits en élévation, on divise la pile en tranches de même hauteur h et de fruits croissants :

$$\varphi_1 \ \varphi_2 \ldots\ldots \varphi_n \quad \text{en élévation ;}$$
$$\varphi'_1 \ \varphi'_2 \ldots\ldots \varphi'_n \quad \text{en travers.}$$



Soient a_n, b_n, les demi-côtés de la section de base de la $n^{ième}$ tranche :

$$a_n = a_0 + h\,[\varphi_1 + \varphi_2 + \ldots\ldots \varphi_n] \qquad b_n = b_0 + h\,[\varphi'_1 + \varphi'_2 + \ldots\ldots \varphi'_n]$$

Si chaque fruit croît, par rapport au précédent, de la même quantité εh, $\varepsilon' h$:

$$a_n = a_0 + nh\left[\varphi_1 + \frac{n-1}{2}\,\varepsilon h\right] \qquad b_n = b_0 + nh\left[\varphi'_1 + \frac{n-1}{2}\,\varepsilon' h\right]$$

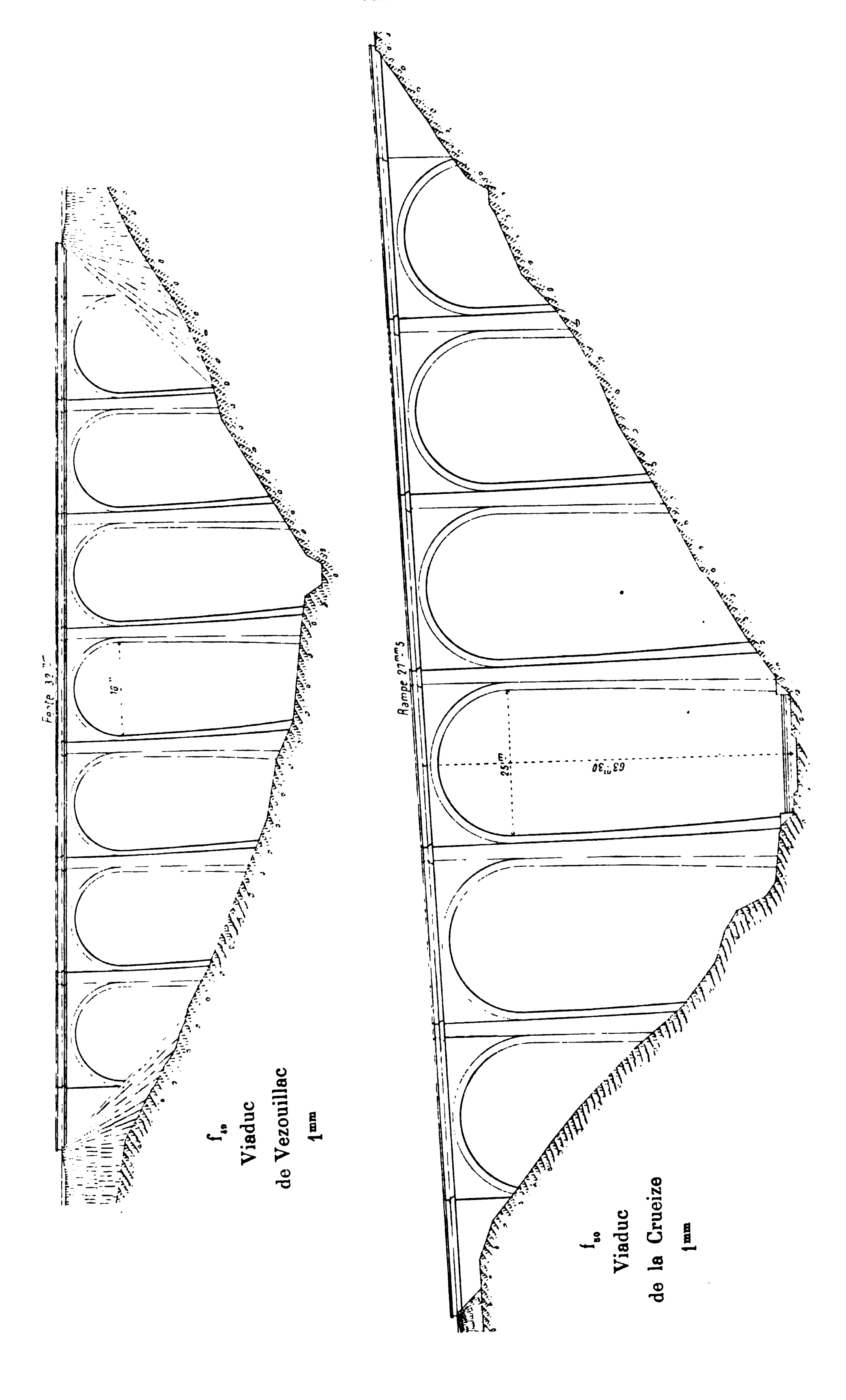
Posons $\qquad \varphi_1 = \varphi_0 + \frac{\varepsilon}{2} h \qquad\qquad \varphi'_1 = \varphi'_0 + \frac{\varepsilon'}{2} h$

Les courbes $A_0 A_1 A_2 \ldots$, $B_0 B_1 B_2 \ldots$ sont les paraboles :

$$x = a_0 + z\left(\varphi_0 + \frac{\varepsilon z}{2}\right) \qquad y = b_0 + z\left(\varphi'_0 + \frac{\varepsilon' z}{2}\right)^{56}$$

56. — Volume au-dessous de $X_5 X_5$ des n tranches de hauteur h $\quad (nh = H)$

$$W = 4H \left\{ \begin{array}{l} a_0 b_0 + (a_0 \varphi'_0 + b_0 \varphi_0)\frac{H}{2} + \left[\frac{a_0 \varepsilon' + b_0 \varepsilon}{2}\left(1 + \frac{1}{2n^2}\right) + \varphi_0 \varphi'_0\right]\frac{H^2}{3} \\ + \frac{\varphi_0 \varepsilon' + \varphi'_0 \varepsilon}{2}\left(1 + \frac{1}{3n^2}\right)\frac{H^3}{4} + \frac{\varepsilon \varepsilon'}{4}\left(1 + \frac{5}{9n^2} + \frac{1}{9n^4}\right)\frac{H^4}{5} \end{array} \right\}$$



f_{49}
Viaduc
de Vezouillac
1mm

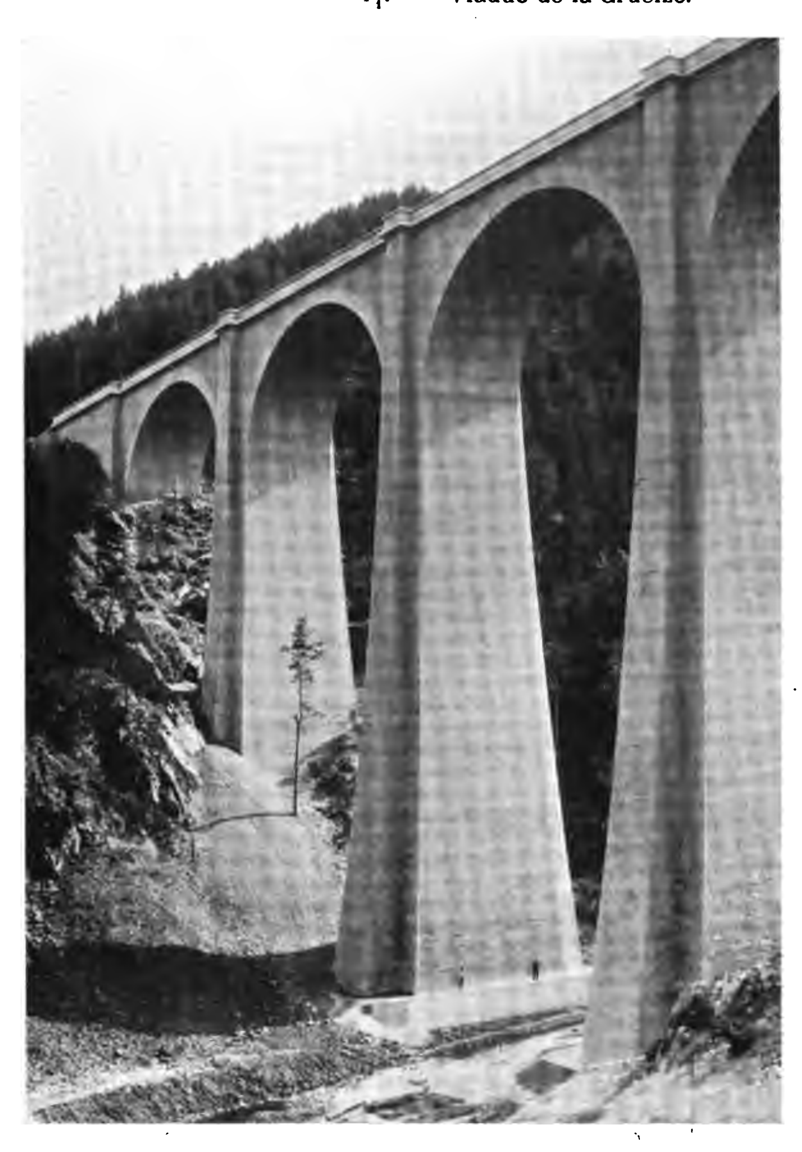
f_{50}
Viaduc
de la Crueize
1mm

On a pris, pour le fruit en élévation, avec $h = 4^m, 5^m$:

$$\varphi_1 = 15^{mm},\ 20^{mm}.$$

Pour élancer la pile, il convient de commencer par un petit fruit : φ croît souvent de 5^{mm} par tranche de 5^m, soit $\varepsilon = 1^{mm}$;

Φ_1. — Viaduc de la Crueize.[63]



Pour le fruit en travers :

$\varphi'_1 = 40^{mm}, 45^{mm}$

$\varepsilon' = 1^{mm}$.

Au pied de grands viaducs,

φ atteint 65^{mm}, 75^{mm}, 85^{mm}

φ' — 100^{mm}, 120^{mm}, 140^{mm}.

Si la stabilité l'exige, on augmente φ_1 et ε, φ'_1 et ε'.

A quelques viaducs, les fruits sont droits en élévation, courbes en travers[57].

Le premier viaduc à piles ainsi profilées est celui de Vezouillac[58, 59] (f_{49}), mais la pression n'y atteint que 6^k28 : ce viaduc, joli par en haut, a les pieds trop gros.

On a fait mieux à St-Laurent d'Olt[60], et encore mieux à la Crueize[61, 62], parce qu'on y a élevé le travail limite (9^k sans surcharge ni vent). C'est le plus beau viaduc de France (f_{50}, Φ_1).

57. — Limoges à Brive par Uzerche.

58. — Le mérite en revient à M. Robaglia, alors Ingénieur en Chef à Rodez.

	Ligne de :	Date	Portée	Hauteur
59	Rodez à Millau	1873-77	16^m	43^m
60	Séverac à Marvejols	1877-79	20^m	53^m
61	Marvejols à Neussargues	1879-83	25^m	63^m

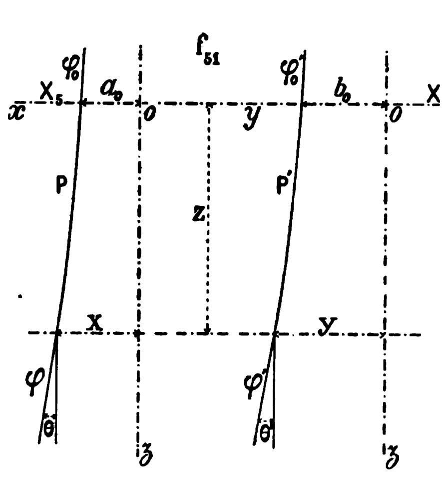
62. — A la Crueize, si la grande pile de 46^m50 eut eu les arêtes droites en conservant ses épaisseurs et ses largeurs aux naissances et en bas, les fruits eussent été : en élévation 0^m035, en travers 0^m102 ; le cube de la pile eut été porté de 4392^{mc} à 4787^{mc}, c'est-à-dire augmenté de 395^{mc} (9 %).

63. — Cliché de M. Terpereau, photographe à Bordeaux.

Art. 5. — Fruits croissants. Profils en côurbe (f_{51}).

A. — Paraboles du 2e degré.

On les préfèrera aux profils en ligne brisée.



1° — Equation. Soient :

ε et ε' les accroissements des fruits φ et φ' par mètre de hauteur.

Les profils sont (f_{51}) :

Parabole P :

$$x = a_0 + \varphi_0\, z + \frac{\varepsilon}{2} z^2 = a_0 + z\,(\varphi_0 + \frac{\varepsilon}{2} z).$$

Parabole P' :

$$y = b_0 + \varphi'_0\, z + \frac{\varepsilon'}{2} z^2 = b_0 + z\,(\varphi'_0 + \frac{\varepsilon'}{2} z).^{64}$$

A z au-dessous du plan X_5X_5, les fruits sont :

$\varphi = \text{tang}\,\theta = \varphi_0 + \varepsilon z \quad \varphi' = \text{tang}\,\theta' = \varphi'_0 + \varepsilon' z.$

2° — Arête. Elle est dans le plan :

$\varepsilon'\,(x - a_0) - \varepsilon\,(y - b_0) = (\varphi_0 \varepsilon' - \varphi'_0\, \varepsilon)\, z$

Sa projection horizontale O'A (f_{52}) est la parabole :

$$[\varepsilon'\,(x - a_0) - \varepsilon\,(y - b_0)]^2 + 2\,(\varphi_0 \varepsilon' - \varphi'_0\, \varepsilon)\,[\varphi'_0\,(x - a_0) - \varphi_0\,(y - b_0)] = 0$$

ou, en prenant comme origine O' sommet de l'arête :

$$(\varepsilon' x' - \varepsilon\, y')^2 + 2\,(\varphi_0\, \varepsilon' - \varphi'_0\, \varepsilon)\,(\varphi'_0\, x' - \varphi_0\, y') = 0$$

L'axe est parallèle à la droite :

$$y = \frac{\varepsilon'}{\varepsilon} x$$

$$\text{Tang}\ \mu_0 \text{ en O'} = \frac{\varphi'_0}{\varphi_0}$$

On a vu que l'arête est dans un plan : ce plan est vertical, par conséquent la projection horizontale est une droite si $\frac{\varepsilon'}{\varepsilon} = \frac{\varphi'_0}{\varphi_0}$.

Voici les silhouettes de 2 viaducs à fruits courbes (f_{53}, f_{54}) ; l'épaisseur des piles aux naissances y varie avec la hauteur (p. 56) ; à Chanteloube (f_{54}), les voûtes sont en ovale surhaussé (p. 55)

B. — Paraboles du 3e degré.

Si la section n'augmentait pas assez vite avec z, on ajouterait un terme en z^3.

Parabole P (f_{51}) : $x = a_0 + \varphi_0\, z + \frac{\varepsilon}{2} z^2 + \frac{\zeta}{6} z^3$

Parabole P' (f_{52}) : $y = b_0 + \varphi'_0\, z + \frac{\varepsilon'}{2} z^2 + \frac{\zeta'}{6} z^3.$

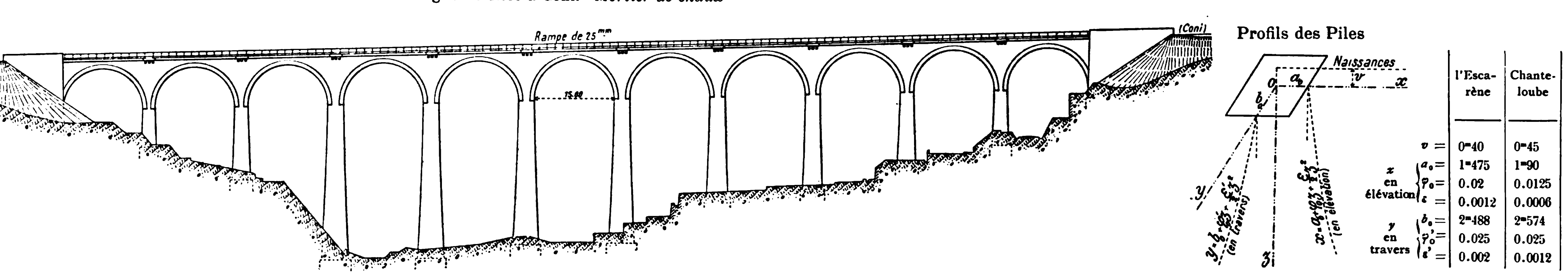
$\text{Tang.}\,\theta = \varphi_0 + \varepsilon\, z + \frac{\zeta}{2} z^2 \qquad \text{Tang}\,\theta' = \varphi'_0 + \varepsilon'\, z + \frac{\zeta'}{2} z^2.$

64. — Volume au-dessous de X_5X_5 sur une hauteur H :

$$V = 4\,H\left[a_0\, b_0 + (a_0\, \varphi'_0 + b_0\, \varphi_0)\,\frac{H}{2} + \left(\frac{a_0\, \varepsilon' + b_0\, \varepsilon}{2} + \varphi_0\, \varphi'_0\right)\frac{H^2}{3} + \left(\frac{\varphi_0\, \varepsilon' + \varphi'_0\, \varepsilon}{2}\right)\frac{H^3}{4} + \frac{\varepsilon\, \varepsilon'}{4} \times \frac{H^4}{5}\right].$$

f_{53} — Viaduc de l'Escarène — 1mm (1913-15)

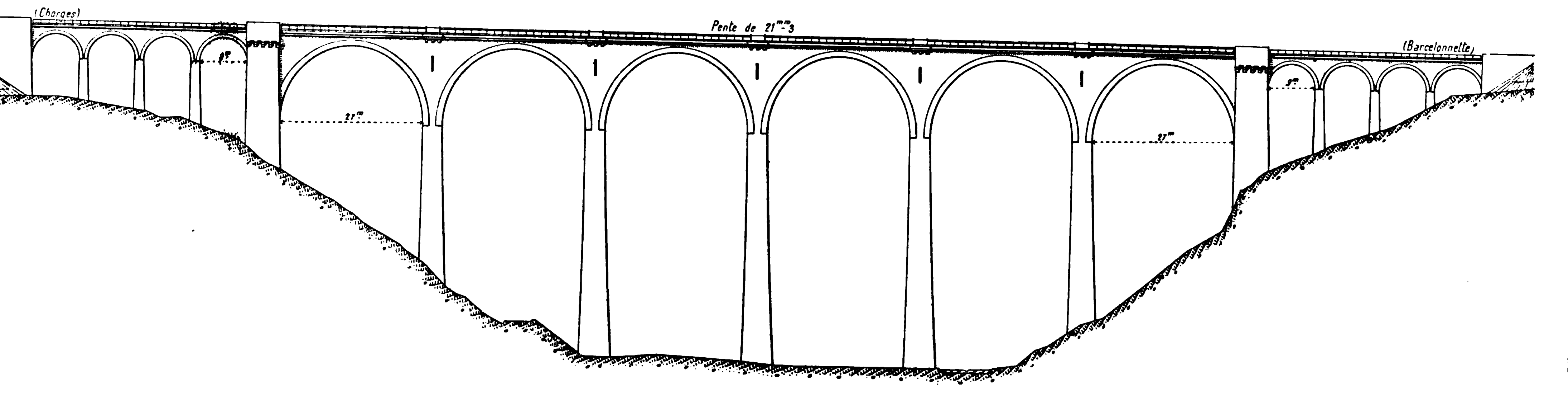
Ligne de Nice à Coni. *Mortier de chaux*



	l'Escarène	Chanteloube
v =	0m40	0m45
x en élévation: a_0 =	1m475	1m90
φ_0 =	0.02	0.0125
ε =	0.0012	0.0006
y en travers: b_0 =	2m488	2m574
φ_0' =	0.025	0.025
ε' =	0.002	0.0012

f_{54} — Viaduc de Chanteloube — 1mm (Projet)

Ligne de Chorges à Barcelonnette. *Mortier de Ciment*



Art. 6. — Hauteur à partir de laquelle on adoptera les fruits courbes.

Des fruits variables donnent quelques sujétions : si faibles qu'elles soient, elles absorbent une petite partie de l'économie sur le cube.

On peut, arbitrairement, fixer à 35^m la hauteur (à 14^m la portée) jusqu'à laquelle on conservera les fruits constants.

§ 3. — *PILES-CULÉES ENTRE ARCHES ÉGALES N'EN PLUS FAIRE*

Si une arche tombe, toutes tombent les unes après les autres. Pour limiter les chutes, à d'anciens viaducs[65, 66], quelquefois à de récents[67], on a épaissi, au grand dommage de l'aspect, une pile sur 3, sur 4.

Mais il est à craindre que, calculées pour être stables, ces « piles-culées » ne soient pas assez rigides et que, sans tomber elles-mêmes, elles laissent tomber les arches[68, 69].

On a construit sans piles-culées nombre de grands viaducs : les très rares que l'on fait encore semblent des organes-témoins reproduits par tradition.

§ 4. — *CONTREFORTS*

Dans les hauts viaducs, on a souvent plaqué sur les piles des contreforts (f_{55}, f_{56}), plus pour les décorer que pour les renforcer.

65. — Viaducs à deux voies et deux étages :

Du Gouet, 59^m45 de hauteur, deux piles-culées (Rennes à Brest) ; — de Morlaix, 62^m16 de hauteur trois piles-culées (Rennes à Brest) 1861-63 ; — de Velars, de la Combe-Bouchard, de la Combe-de-Fin, une pile-culée par 5 arches (tous les trois sur la ligne de Paris à Dijon, descente de Blaizy à Dijon) 1847-49.

66. — Cette précaution est fort ancienne : il y a 2 piles-culées au pont de Blois (1716-1724).

67. — Viaducs : du Blanc (Poitiers au Blanc) 1881-85, 21 arches de 20^m, 4 piles-culées ; — de l'Auzon (Argenton à La Châtre) 1897-1900, 42^m70 de hauteur, 20 arches de 20^m, 2 piles-culées ; — sur l'Oued Beja (Mateur à Nebeur, Tunisie) 1908-10, 54^m de hauteur, 12 arches de 21^m, piles courantes de 4^m20 aux naissances, piles-culées de 6^m20, une pile-culée par 4 arches.

Aux viaducs de la ligne du Lœtschberg 1910-12, on a « renforcé » chaque 6e pile pour des voûtes de 10^m, chaque 5e pour 12^m, 14^m, chaque 4e pour 16^m, 18^m 20^m.

68. — Chute du pont de Vernon (III, p. 378).

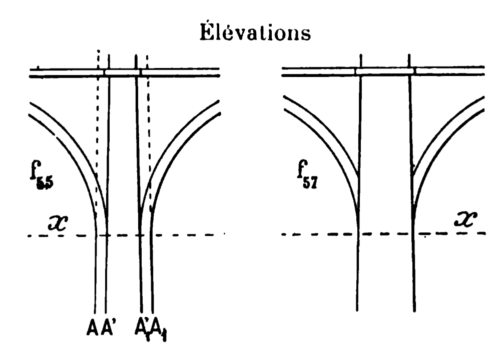
Φ_2. — Viaduc de Poix



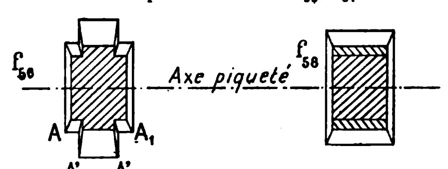
69. — Le 31 août 1914, le Génie Français a fait sauter des arches côté Amiens du viaduc de Poix (ligne d'Amiens à Rouen), ouvrage en briques, hauteur maxima 30^m, 12 arches de 16^m50 en 4 groupes de 3, limités par des piles-culées. Les arches côté Amiens sont tombées jusqu'à une pile-culée (Φ_2) qui s'est inclinée vers Amiens de 48^{cm} au niveau du rail ; l'arche au delà (côté Rouen) s'est fendue : on n'en a conservé que les retombées.

Il est permis de penser que cette pile-culée a sauvé les 6 arches côté Amiens. A certains hauts viaducs à couper en temps de guerre, peut-être convient-il de ménager des piles-culées, mais assez épaisses pour ne pas fléchir si une des arches qui les encadrent est ruinée.

Élévations



Coupe sur xx de f_{55}, f_{57}



Les 4 arêtes A, A_1, A', A'_1, doivent, pour l'aspect, concourir en un même point au-dessus de l'ouvrage (f_{55}).

Les fruits des contreforts sont moindres en élévation que ceux des arêtes de la pile, par exemple de 1^{cm}, plus grands en coupe transversale, par exemple de 2^{cm}.

Le contrefort laisse apparaître les bandeaux des deux arches qui l'encadrent : pour qu'il ne soit pas trop maigre, il faut des arches d'au moins 16^{m}.

On lui a, quelquefois, donné la largeur même de la pile (f_{57}). On supprime ainsi deux arêtes ; mais il y a un peu plus de cube. Quoique les bandeaux soient assez fâcheusement coupés, ce n'est pas laid.

Φ_3. — Viaduc de Piou[70, 71].



Souvent, aux viaducs divisés par des piles-culées, on n'a fait de contreforts qu'à ces piles-là.

Il y a de fort beaux viaducs avec contreforts (Φ_3) : on en peut faire de tout aussi beaux sans contreforts.

Au-dessus des naissances, ils ne servent qu'à supporter les niches de refuge ; ils compliquent l'appareil des tympans.

70. — Ligne de Séverac à Marvejols (1877-79). Il est de la famille des viaducs de Morandière (Aulne, Pompadour,...)

71. — Contre les tailloirs des contreforts, voir V p. 99.

Au-dessous, ils renforcent la pile ; mais on peut trouver à meilleur marché la surface nécessaire en faisant croître les fruits.

Il vaut mieux n'en plus faire.

Ceci ne s'applique qu'aux viaducs à arches égales. Un contrefort, un pilastre peuvent utilement encadrer une grande arche, séparer un corps central à grandes arches d'un viaduc d'accès à petites.

§ 5. — *MASSIF DE FONDATION*

Art. 1. — En règle générale, dresser le sol horizontalement sans gradins[72]

A. — On est sur rocher.

Supposons qu'on ait taillé le rocher en gradins, avec marches horizontales AB, CD, EF (f_{59}).

La tranche de maçonnerie B B' C C' tasse ; les pointes de rocher qui, elles, ne tassent pas, tendent à y entrer comme des coins et à la fendre ; le danger augmente :

1° — avec la charge. — Donc pas de gradins sous les piles des hauts viaducs. On dressera horizontalement le fond de la fouille, même au prix d'un grand déblai de rocher.[73]

2° — avec la hauteur des gradins. — Donc, si on accepte les gradins, qu'ils soient petits.

3° — avec la nature de la maçonnerie sur les gradins. — Employer des moellons à assises horizontales au lieu de moellons bruts, du mortier de ciment au lieu de mortier de chaux, et laisser durcir le mortier avant de continuer.

B. — On n'est pas sur rocher.

Supposons maintenant que l'on ait affaire à un terrain moins résistant que la maçonnerie (calcaire tendre, marne, tuf, etc...)

Si on y taille des gradins, ce seront eux qui tasseront plus que la maçonnerie : leurs pointes céderont et ne la soutiendront plus.

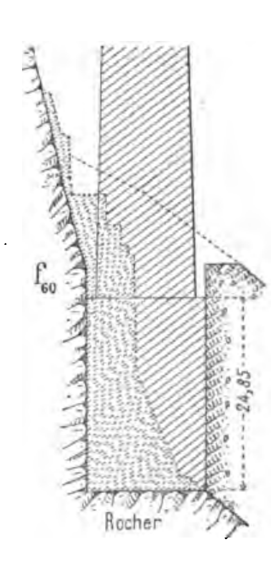
Donc, pour tous terrains, une haute pile sera bâtie sur plate-forme horizontale sans gradins.

Art. 2. — Ne pas s'arrêter à la surface du rocher. S'encastrer dans le vif.

Souvent, le dessus du rocher n'est pas bon. Il faut atteindre le vif[74].

Art. 3. — Bien nettoyer le sol de fondation.

Au moment où l'on commence à maçonner, la fouille doit être bien purgée, bien propre.



72. — Pour les gradins sous les ouvrages de 8m et au-dessous, voir p. 30.

73. — Au viaduc des Crottes (Morbier à Morez), on a rencontré le rocher disposé comme l'indique f_{60}.
On a tout déblayé jusqu'à une plate-forme horizontale tout entière dans le rocher.

74. — Au viaduc de Mussy (Paray-le-Monial à Givors), 63m de hauteur, on est descendu à 8m dans le rocher tendre.
Au pont sur la Seine, près de Montereau (Corbeil à Montereau), on a rencontré sous le gravier une craie tendre à 4m17 sous l'étiage. Il fallut descendre à 15m45 pour trouver une bonne craie résistante.

S'il restait à sa surface une couche molle, la maçonnerie la chasserait par son poids et tasserait de l'épaisseur de cette couche.

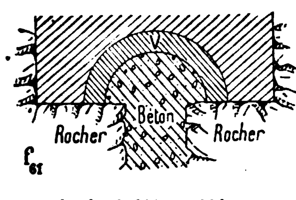
Si le fond est du rocher, il faut le piquer à la grosse pointe, bien enlever les recoupes et la poussière, puis bien laver à grande eau et poser la première assise sur une couche de mortier.

Certains terrains, le sable argileux par exemple, se ramollissent par l'eau et sous les pieds des ouvriers. Il faut bien nettoyer et décaper la fouille à vif et couler rapidement une couche générale de béton de ciment qu'on laisse prendre et sur laquelle on maçonne.

Sur quelque terrain que l'on fonde, il est bien entendu que l'Ingénieur ne laissera pas commencer les maçonneries avant d'avoir, *lui-même*, vérifié et accepté la plate-forme; il surveillera, *lui-même*, la pose des premières assises.

Si la plate-forme est ramollie par l'eau, on l'asséchera, si on le peut, par des galeries[75].

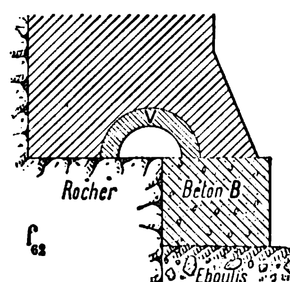
Art. 4. — Il y a des fissures dans le rocher de fondation.



On les nettoie à vif et on les bourre de béton de ciment[76].

Si une fissure profonde traverse la fondation, on la vide sur 2 ou 3^m, on la bourre de béton de ciment, dessus on construit une voûte V (f_{61})[77].

Art. 5. — On trouve, en fondation, deux natures de sol.



On fait alors au mieux, suivant les circonstances, pour diminuer la pression sur la partie la plus faible et la répartir le plus également possible sur toute la fondation.

Si, par exemple (f_{62}), on trouve d'un côté du rocher, de l'autre des éboulis, on élargira la fouille du côté des éboulis ; on coulera dessus un massif de béton de ciment B : par dessus la surface séparant le rocher des éboulis, pour égaliser les pressions, on jettera une voûte V, une dalle en béton armé....

Art. 6. — Ressaut.

Au-dessous du sol naturel, il faut ménager un ressaut :

1°. — *pour élargir la base d'appui, en vue de réduire la pression* sur le sol ou sur les maçonneries. On le détermine d'après la pression limite admise.

2°. — *pour parer aux erreurs d'implantation.* On lui donne, en général, 0^{m}20, 0^{m}25, 0^{m}30, — jusqu'à 0^{m}40.

Quand la maçonnerie repose sur du béton, il faut augmenter le ressaut pour qu'il n'y ait pas de pression près de l'arête du béton. On a été jusqu'à 0^{m}90, 1^m.

3°. — *pour parer aux déplacements des massifs descendus, soit par havage, soit à l'air comprimé.* On le fera d'autant plus grand que les massifs auront plus à descendre[78] ; s'ils doivent traverser une épaisseur H de terrain, on donnera au ressaut : $0^m20 + 0{,}02\,H$.

75. — Travaux d'assainissement et de consolidation de la ligne de Lons-le-Saulnier à Champagnole, — viaducs de l'Ermitage et de Vertancul.
Annales des Ponts et Chaussées, 1893, 2e semestre, p. 573, — MM. Moron et Canat.

76. — Viaduc de Puyredon (Nontron à Sarlat), 1893-94.

77. — Viaducs du Boulet (Cahors à Brive), de Bramefond (Saint-Denis au Buisson).

78. — On a constaté des déplacements :
de 0^{m}65 à une pile du viaduc du Val Saint-Léger (Ligne de la Grande-Ceinture) descendue à 30^m ;
Annales des Ponts et Chaussées, novembre 1882. « *Notice sur la Traversée du Val St-Léger* », M. Geoffroy.
de 0^{m}20 à une pile du pont de Marmande, (Ligne de Marmande à Casteljaloux, 1880) descendue à 6^m dans du gravier, puis du tuf.

TYMPANS

§ 1. — *FRUIT DU PAREMENT VU*

Art. 1. — Il faut donner du fruit aux tympans.

Les tympans sont au-dessus de piles en fruit.

A nombre de viaducs, ils n'ont pas de fruit (f_{63}), mais l'œil y redresse la pile CB et voit le tympan BA en surplomb : c'est choquant.

Quand on s'est inquiété de l'aspect, — et il s'en faut toujours inquiéter, — on a donné du fruit aux tympans : à beaucoup 20mm, assez souvent 30mm [79].

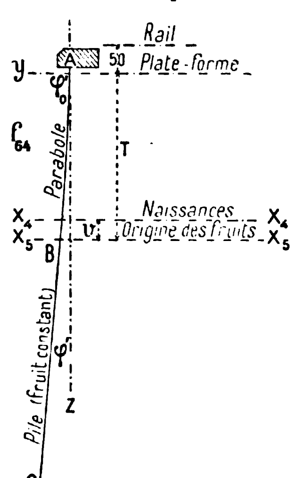
C'est aussi un peu plus stable.

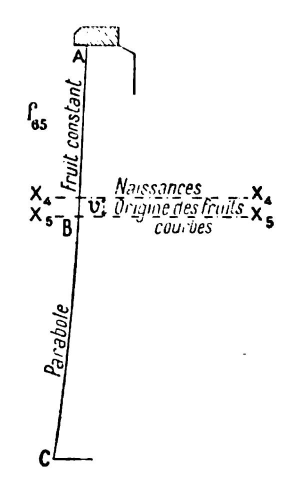
Art. 2. — Fruits à adopter.

1er Cas. Pile à fruit constant.

A. — Tympan ayant même fruit que la pile. — Cette disposition augmente un peu le cube des maçonneries : on ne l'adoptera donc que pour les petits viaducs. J'admets, un peu arbitrairement, 20m comme limite de hauteur [80].

Pour la pile, comme pour les tympans, le fruit transversal φ' sera 30mm, 40mm, au plus 50mm.





B. — Tympan parabolique (f_{64}). — Le tympan est dressé suivant une parabole ABC à axe horizontal, tangente en B à la pile de fruit φ' et ayant sous la plinthe un fruit très faible φ'_0, par exemple, 2mm ; elle a pour équation :

$$y = z\left(\varphi'_0 + \frac{\varphi' - \varphi'_0}{2T}\, z\right).$$

2e Cas. Pile à fruit courbe (f_{65}).

La coupe du tympan AB est une droite tangente en B à la parabole de la pile.

79. — et même 50mm. C'est trop pour des viaducs en alignement. On a été jusqu'à 70mm, mais pour les tympans convexes de viaducs en courbe.

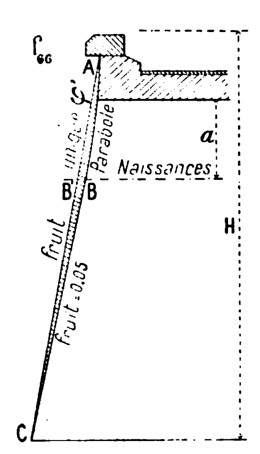
80. — Soient, pour un viaduc de hauteur H et d'ouverture $2a$ (f_{66}) :

V_2 le volume des maçonneries entre les plans verticaux des clefs de deux voûtes voisines ; les piles ont un fruit constant de 25mm en élévation, de 50mm en coupe transversale ; les tympans sont dressés suivant une parabole ABC tangente aux piles à leurs naissances B et dont l'axe passe par le dessous de la plinthe.

V_1 le volume défini de même, mais avec tympan et pile dressés en coupe transversale suivant un fruit unique AB'C.

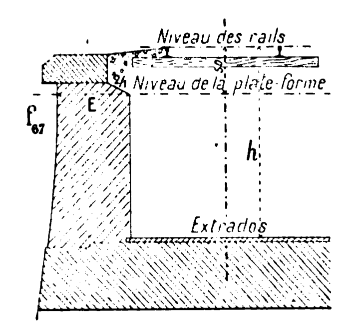
On trouve :

Hauteur H	Ouverture $2a = 0{,}4$ H	$V_1 - V_2$	Hauteur H	Ouverture $2a = 0{,}4$ H	$V_1 - V_2$
12m50	5m	1mc57	30m	12m	18mc
17m50	7m	3mc95	37m50	15m	34mc
25m	10m	10mc73	50m	20m	78mc



§ 2. — *TYMPANS PLEINS*

Art. 1. — Epaisseur.

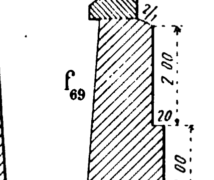


Pour les tympans pleins, ou évidés par des voûtes longitudinales de 1m30 au plus de portée, E ne descend pas au-dessous de 0m80, ne dépasse guère 1m20, est d'ordinaire 1m.[81]

Le plus souvent, le parement intérieur est vertical.

On a quelquefois donné un fruit intérieur (f_{68}) ; ce n'est pas bon : au passage des trains, le remplissage peut faire coin et tendre à les ouvrir. Il est préférable de ménager des redans de 0m20 tous les 2m (f_{69}).

Art. 2. — Remplissage entre les tympans.



Il doit :

1°. — être et rester incompressible, sec ou mouillé, pour ne pas s'enfoncer sous les trains ;

2°. — être insensible à l'action de l'eau, c'est-à-dire n'être ni gonflé, ni imprégné, ni décomposé, ni entraîné par elle : donc pas de remblais terreux, argileux, crayeux, gypseux ;

3°. — tenir, sec ou mouillé, à un talus aussi raide que possible, pour ne pas pousser sur les tympans : donc pas de remblais argileux, sablonneux, qui poussent quand ils sont mouillés ;

4°. — au-dessus de la chape, être très perméable, pour que l'eau y arrive tout de suite et ne séjourne pas dans l'ouvrage.

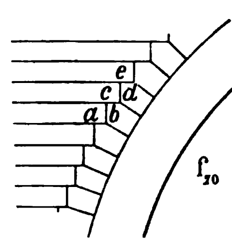
5°. — être léger, pour réduire la poussée dans les voûtes et la charge sur le sol.

Toutes ces conditions sont satisfaites par un remplissage en graviers bien lavés ; mieux, par des déblais rocheux rangés à la main.

Entre les voûtes et la chape (si elle n'est pas appliquée sur les voûtes elles-mêmes), on peut employer du béton maigre contenant seulement 100k de chaux par m.c. de sable. Mais il faut le faire par temps sec et l'abriter aussitôt fait : s'il pleut dessus, il s'y emmagasine de l'eau qui ne peut plus sortir ensuite qu'à travers les voûtes ou les tympans.

Art. 3. — Raccordement de l'appareil des tympans avec celui des bandeaux.

Si le tympan est à joints incertains (MOI), aucune difficulté.

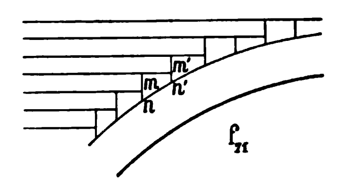


Mais, si les moellons de parement sont par assises horizontales (MOH, ME), ils rencontrent l'extrados du bandeau suivant des becs de flûte de plus en plus aigus à mesure que l'on se rapproche de la clef.

Le plus rationnel serait d'appareiller en crossettes les moellons de raccordement (f_{70}). On l'a fait quelquefois, mais au détriment de l'aspect : les pointes *a*, *c*, *e*... *b*, *d*... dessinent des courbes d'extrados qui nuisent à celle du bandeau.

Il vaut mieux conserver les assises horizontales et couper simplement les angles

81. — Voir plus loin renvoi 90.



trop aigus (f_{71}) : on commence, pour les pleins cintres à bandeaux extradossés parallèlement, à 45° de la verticale. Les pointes *mn, m'n'*... des moellons auront au moins 0^m10.

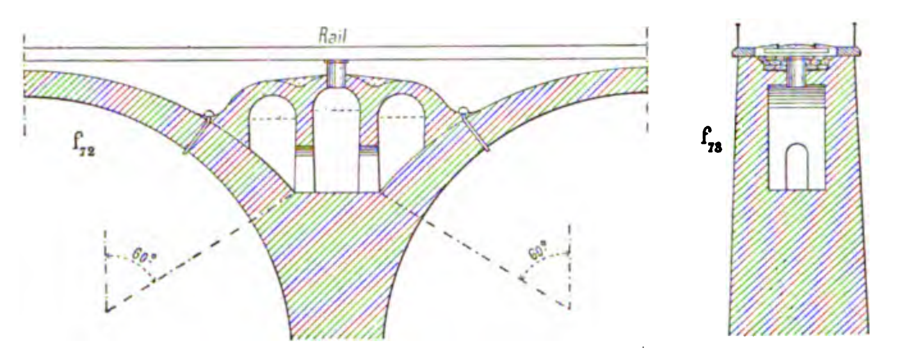
§ 3. — *TYMPANS ÉLÉGIS*[82]

Art. 1. — Portée à partir de laquelle on élégit.

On n'évidera pas au-dessus de pleins cintres de moins de 15^m ; on évidera toujours à plus de 19^m.

Art. 2. — Elégissements transversaux.[83]

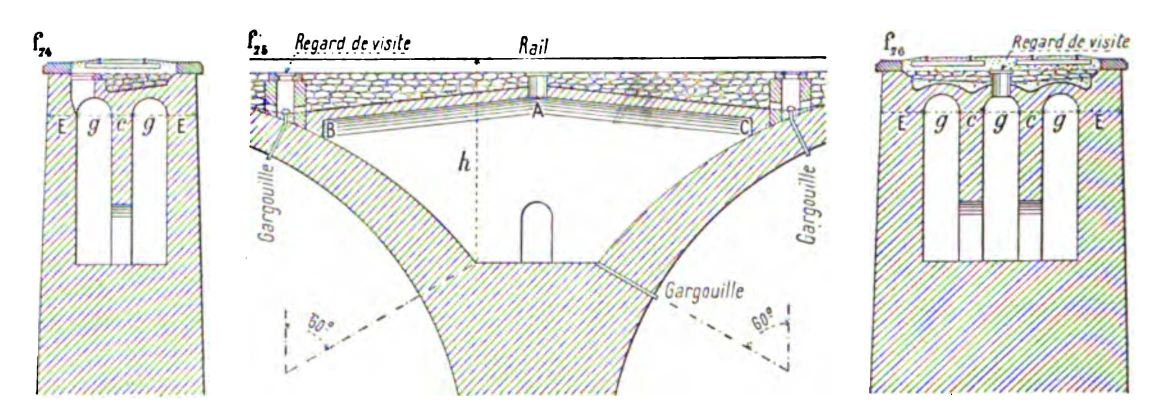
On se gardera de les montrer. On ne jettera pas d'arc unique entre deux grandes voûtes[84]. On élégira par de petits pleins cintres cachés (f_{72}, f_{73})[85].



Ils relient les tympans que tendent à écarter les voûtes longitudinales : ceux-ci ne sont plus qu'un masque, on en réduit l'épaisseur à 0^m70, 0^m80.

Art. 3. — Elégissements longitudinaux.[86]

Les voûtes d'évidement ont 1^m20, 1^m30 sur cloisons de 0^m60 : il y en a deux aux viaducs



82. — Voir V, p. 50 et suivantes.
83. — V, p. 51, 57, 58.
84. — Viaducs de la ligne de Millau à Séverac (1873-77),
85. — V, p. 59, § 6.
86. — V. p. 59.

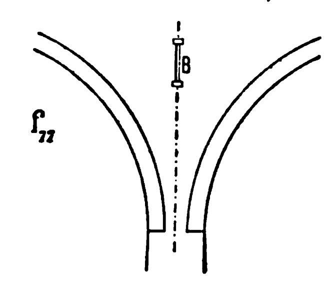
à 1 voie (f_{74}, f_{75})[87, 88], trois à ceux à 2 voies (f_{76}, f_{75})[89, 90].

A partir du milieu A (f_{75}), elles auront des pentes d'au moins 5cm.[91]

Elles sont presque toujours en plein cintre : elles seraient mieux en ogive, en ellipse surhaussée, pour moins pousser les tympans[86].

Elles répartissent mal les charges sur les grandes voûtes[92].

Dans les courbes, à leur poussée s'ajoute la force centrifuge.



Art. 4. — Il faut visiter les élégissements cachés.

On y descendra par des regards débouchant, pour les viaducs à 1 voie, soit dans les trottoirs contre les plinthes, soit dans l'axe de la voie ; pour les viaducs à 2 voies, dans l'entrevoie.

Art. 5. — Il faut les aérer.

Les maçonneries se conservent mal dans l'air humide.

Dans nos derniers grands viaducs, nous avons traversé le tympan par une barbacane B (f_{77}).

CHAPITRE VIII

CULÉES[93]

Les culées sont les parties les plus variables des ouvrages ; elles dépendent encore plus que les autres de la forme et de la nature du terrain.

On ne peut donc donner ici que des indications tout à fait générales.

87. — Il n'y en a qu'une aux viaducs des lignes de Tournemire au Vigan (1886-95), d'Espalion à Bertholène (1903-07) ; elle a alors 1m60, 1m80. Il faut pour la tenir des tympans épais.

88. — Il y en a 3 de 0m80 au viaduc de Légaud (Eymoutiers-Meymac), 3 de 0m70 à celui de la Donne (Saint-André à Puget-Théniers 1905-07).

89. — Il n'y en a que deux aux viaducs de l'Aulne (Nantes-Landerneau), de Mussy (La Clayette-Lamure 1892-95). Elles ont 2m, 2m30. C'est trop.

90. — Voici quelques exemples :

	Viaduc de	Ligne de	Dates de construction	Ouverture des grand^es arches 2a	Voûtes d'élégissement en plein cintre: Ouverture e	Epaisseur des cloisons c	Hauteur du rail au-dessus du creux h	Epaisseur des tympans E: hors du contrefort	y compris le contrefort
1 Voie, 2 voûtes d'élégissem^t, f_{74} — f_{75}	Vignols	Limoges à Brive	1872-75	20m	1m30	0m60	6m10	0m70	1m15
	Pompadour			25	1. 30	0. 60	8. 21	0. 96	1. 35
	La Sagne			20	1. 30	0. 60	6. 10	0. 70	1 15
	Le Sarget			20	1. 30	0. 60	6. 10	0. 70	1. 15
	Le Blanc	Poitiers au Blanc	1881-85	20	1. 05	0. 75	6. 90	1. 03	
	Barajol	Bort à Neussargues	1903	20	1. 00	0. 60	3. 59	1. 10	1. 48
	Saint-Waast	Montauban à Castres	1882-84	20	1. 20	0. 59	6. 00	0. 96	Pas de contrefort
	L'Auzon	Argenton à La Châtre	1897-1901	20	1. 20	0. 60	7. 19	0. 89	
2 Voies, 3 voûtes d'élégissem^t, f_{75} — f_{76}	Piou	Séverac à Marvejols	1878	20	1. 20	0. 80	6. 45	1. 60	2. 21
	Senouard	Marvejols à Neussargues	1879-83	18	1. 20	0. 80	6. 15	1. 60	2. 15
	Chanteperdrix			20	1. 20	0. 80	6. 50	1. 66	2. 40
	La Crueize			25	1. 20	0. 80	7. 70	1. 66	2. 60
	Saint-Satur	Bourges à Cosne	1891-93	13	1. 60	0. 70	4. 40	1. 15	1. 75

91. — Au viaduc du Blanc, cette pente atteint 24cm5.

92. — V, p. 50.

93. — V, p. 42 et suivantes.

§ 1. — *PARTIES VUES*

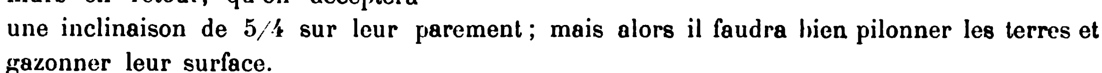
Art. 1. — Rôle apparent des culées. Elles arrêtent, elles encadrent l'ouvrage.

On les fera ressauter de 0^{m}35 à 0^{m}50 par rapport au nu des tympans (f_{78}, f_{79}) ; on les surmontera d'un parapet plein, sans plinthe. On ne comprend guère en effet une plinthe se prolongeant sur la culée et se perdant dans un quart de cône ou dans le terrain. Ces culées brutales arrêtent bien l'ouvrage[94].

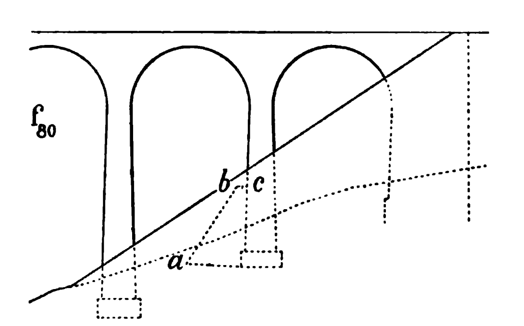
Art. 2. — Quarts de cône.

On a souvent perreyé les quarts de cône pour raidir leurs talus : c'est laid et d'entretien coûteux ; on ne fera de perrés que pour les protéger contre les crues.

En principe, les quarts de cône seront à 3/2 : ce n'est qu'exceptionnellement, s'il faut réduire les murs en retour, qu'on acceptera une inclinaison de 5/4 sur leur parement ; mais alors il faudra bien pilonner les terres et gazonner leur surface.



Il est bon que sur 0^{m}30 le quart de cône découvre le pied P de l'arête de la culée, et recouvre l'extrémité S du parapet (f_{78}).



Pour raccourcir les murs en retour, on a quelquefois noyé dans de grands quarts de cône les pieds des piles voisines (f_{80}). La dernière arche, ainsi aveuglée, est d'un aspect fort désagréable. De plus, il est arrivé que la pile voisine de la culée a été renversée par la poussée de la terre[95].

Il est prudent de buter une pile noyée dans le quart de cône par un massif *a b c*.

Il vaut mieux, s'il y a économie appréciable, porter les extrémités des murs en retour sur des consoles en pierre, ou mieux, en béton armé, qui permettent un plus grand porte-à-faux.

Ces consoles doivent être cachées dans le quart de cône[96].

Art. 3. — Fruit des parements.

Le parement antérieur des culées, quand il est vu, et les arêtes en élévation du ressaut des culées, seront au fruit de 0,025 (1/40).

Leurs faces auront le fruit moyen des tympans : si les fruits différaient, la surface de moindre fruit paraîtrait se déverser.

94. — V, p. 47. 95. — Pont de Pont de Bordes (Ligne de Condom à Port-Sainte-Marie).

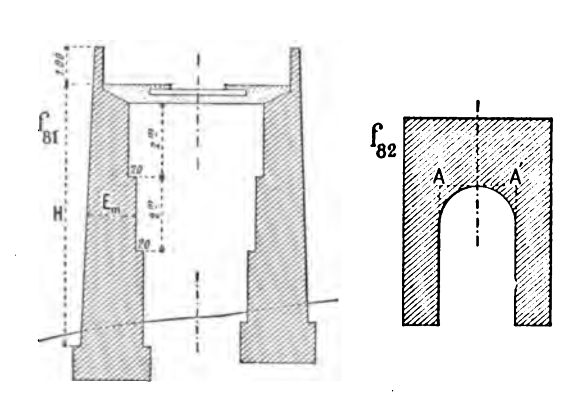
96. — V, p. 45, 46.

§ 2. — *PARTIES CACHÉES*

Art. 1. — Culées à murs en retour indépendants.

Tant que la hauteur est faible (4 ou 5m au plus) les deux murs en retour peuvent rester indépendants (f_{81}).

On leur donne une épaisseur moyenne : $E_m = 0,25\ (1 + H)$.



Leur parement caché est vertical ou avec des gradins de 0m20 tous les 2m environ.

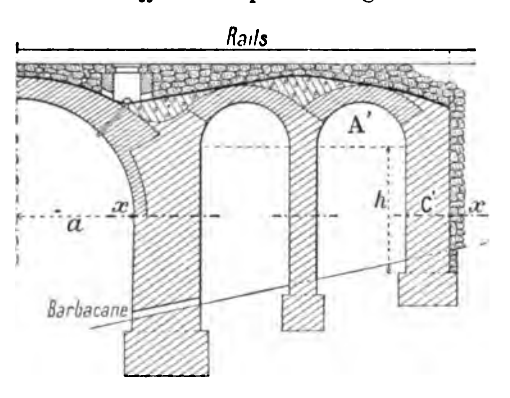
Il faut, pour ne pas amorcer de fissures, adoucir les angles rentrants A et A' par des congés à grand rayon (f_{82}).

On remplit, entre les murs en retour comme entre les tympans, avec des déblais rocheux rangés à la main.

Art. 2. — Culées évidées.

A. — Types d'évidement.

f_{83}. — Coupe en long



Pour des hauteurs de plus de 4m, 5m, les murs seraient en bas très épais, l'intervalle entre leurs parements cachés, très réduit : on aurait beaucoup de maçonnerie pour peu soutenir.

Il faut, alors, évider les culées :

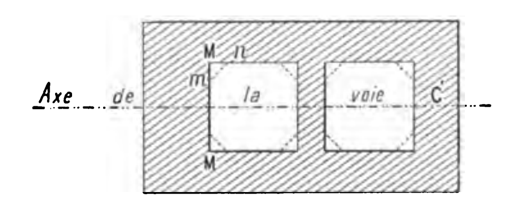
soit par des voûtes à génératrices parallèles à l'axe de la voie ; elles poussent les murs en retour ; on n'en fait plus guère ;

soit par des voûtes à génératrices perpendiculaires à l'axe de la voie (évidements transversaux) ;

soit, mieux, par des puits verticaux.

B. — Evidements transversaux (f_{83}).

f_{84}. — Coupe sur *xx* de f_{83}



Les murs en retour ne sont plus alors que de simples masques; leur épaisseur peut être réduite à 1m.

L'épaisseur C' de la culée de la voûte extrême doit assurer la stabilité, sans tenir compte de la poussée des terres[97].

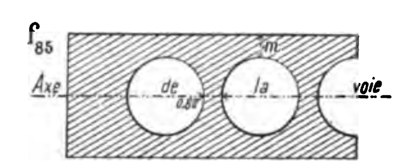
Pour prévenir les fentes aux angles rentrants M (f_{84}), on les amortit par des pans coupés *mn*; mieux, on les arrondit. On est ainsi conduit au meilleur système d'évidement, qui est par puits verticaux.

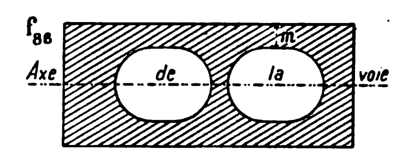
97. — On pourra accepter la formule précédemment donnée pour les ouvrages sous rails, en plein cintre, de 8m d'ouverture et au-dessous :

$$C' = 0^m30 + 0,20\ A' + 0,20\ h.$$

C. — Puits verticaux.

Ils sont à section horizontale circulaire (f_{85}) ou, exceptionnellement, un peu allongée (f_{86}) : le grand axe dans le sens de la voie et non normalement à la voie comme on l'a fait quelquefois fort à tort.



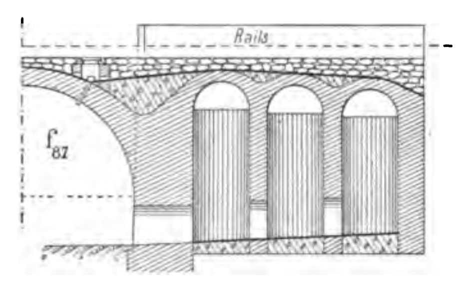


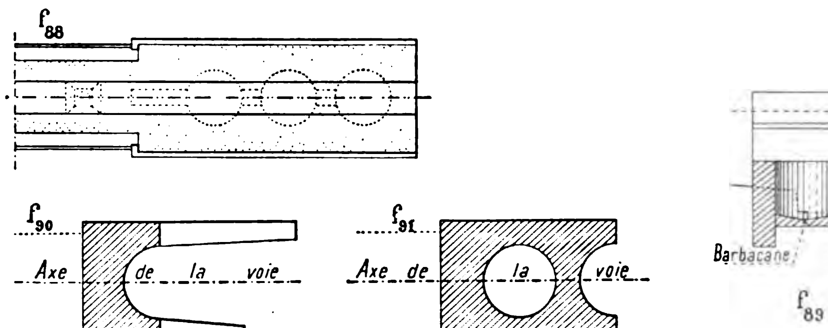
On peut réduire à 0^{m}80 la cloison entre puits, à 1^m le masque *m* (f_{85}, f_{86}).

Les puits sont :

soit couverts par des voûtes sphériques ou, plus pratiquement, par des voûtes transversales en berceau ; on les laisse vides ; on les aère par des soupiraux grillés, — on évacue l'eau au pied et, si c'est possible, on permet d'y accéder, par exemple par une porte percée dans la culée ou dans un des murs en retour (f_{87}, f_{88}) ;

soit ouverts ; on les remplit alors de déblais rocheux et on assure avec soin l'écoulement des eaux par des barbacanes, soit sous la dernière arche (f_{89}), soit dans une pierrée enveloppant la culée.





Art. 3. — Epaisseur des culées.

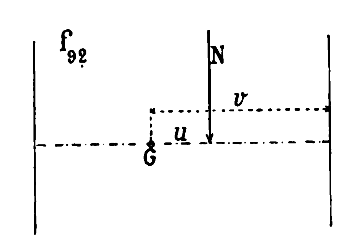
Il n'y a pas de bonne formule pour déterminer l'épaisseur d'une culée de viaduc.

On l'arrête par une épure.

Dans la résistance de la culée, on compte tout ou partie des murs en retour, les puits.

Dans f_{90}, f_{91}, on admettra que tout ce qui est « hachuré » résiste à la poussée[98].

Voici quelques dispositions de culées :



98. — Soient :

Ω la surface de la section, évidements déduits ;

G le centre de gravité de Ω à *v* de l'arête ;

I le moment d'inertie par rapport à l'axe transversal mené par G (déterminé en tenant compte des évidements) ;

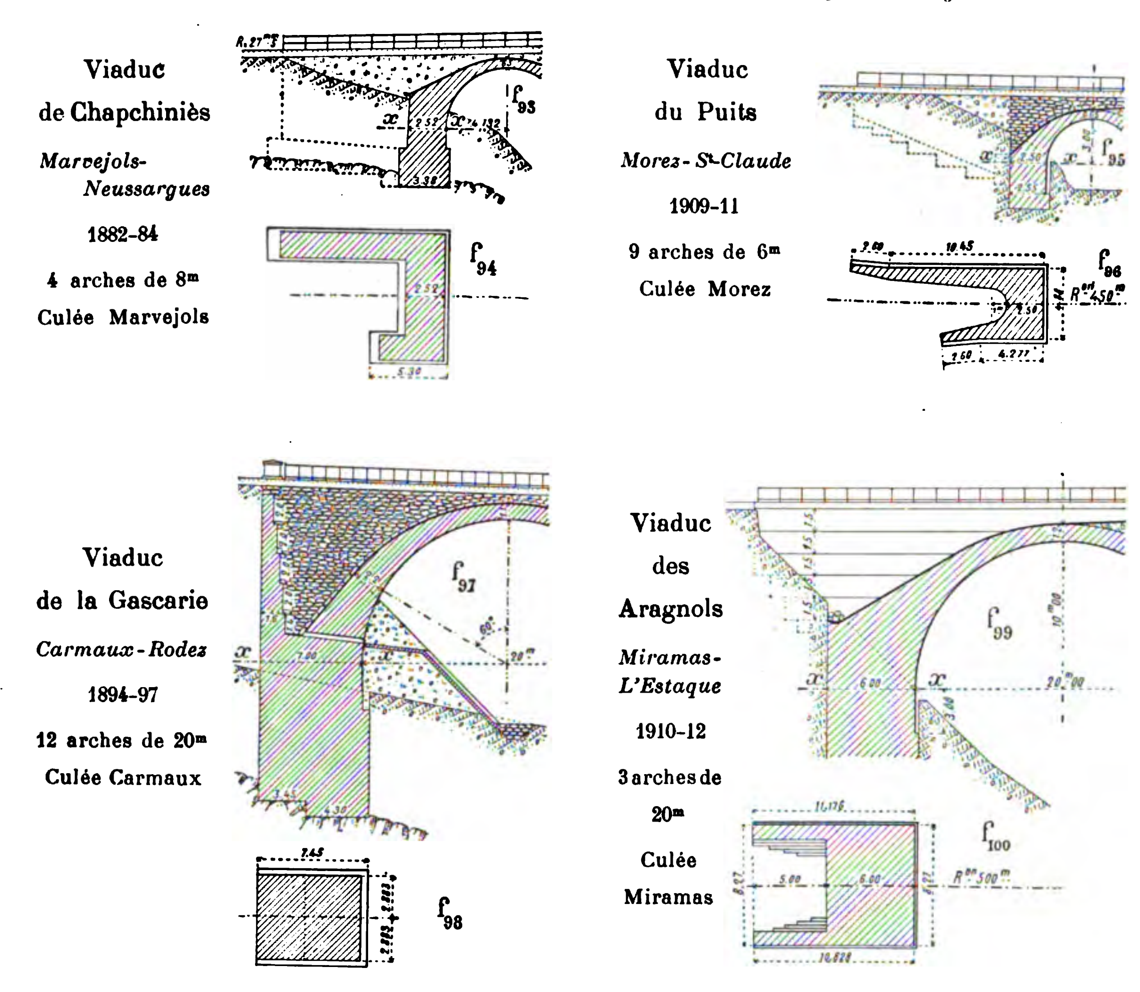
N l'effort normal agissant à *u* de G (f_{92}).

On calculera l'effort maximum sur l'arête par la formule ordinaire :

$$\max \beta = \frac{N}{\Omega}\left[1 + \frac{u\,v\,\Omega}{I}\right]$$

Culées non évidées

Coupes en long sur l'axe et coupes horizontales sur xx des coupes en long — 2mm



Viaduc de Chapchiniès
Marvejols-Neussargues
1882-84
4 arches de 8m
Culée Marvejols

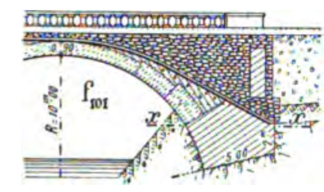
Viaduc du Puits
Morez-St-Claude
1909-11
9 arches de 6m
Culée Morez

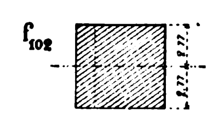
Viaduc de la Gascarie
Carmaux-Rodez
1894-97
12 arches de 20m
Culée Carmaux

Viaduc des Aragnols
Miramas-L'Estaque
1910-12
3 arches de 20m
Culée Miramas

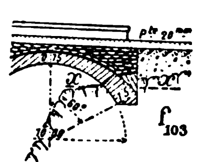
Culées perdues

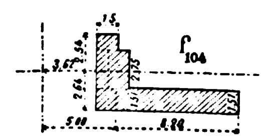
Pont de St Waast
Montauban-Castres 1882-84
5 arches de 20m
Culée Castres





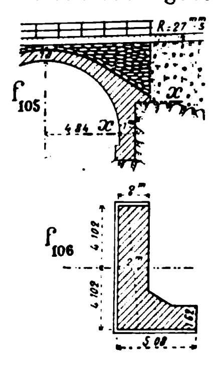
Viaduc de la Mouline
Carmaux-Rodez 1894-95
7 arches de 10m et 1 de 17m
Culée Rodez





Culée butée contre le terrain

Viaduc du Lignon
Marvejols-Neussargues 1880-82
10 arches de 10m
Culée Neussargues



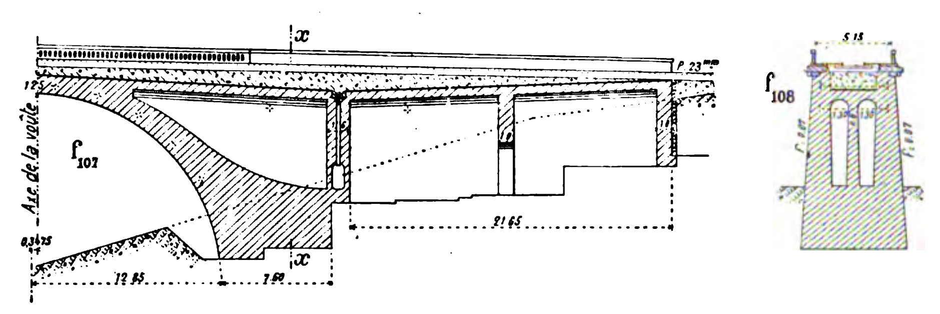
Culées élégies par des voûtes longitudinales

Coupes en long sur l'axe et coupes en travers sur xx des coupes en long — 2mm

Viaduc de Pompadour

Limoges-Brive, 1873-75 — 8 arches de 25m

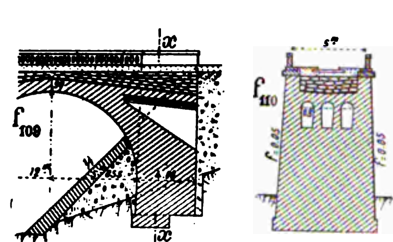
Culée Brive



Viaduc de Légaud

Eymoutiers-Meymac, 1880-81

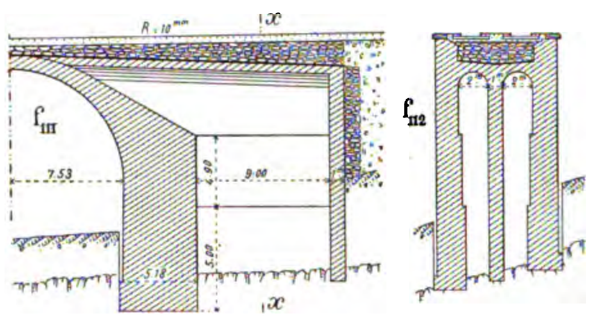
5 arches de 12m



Viaduc de Civrieux

Paray-le-Monial-Givors, 1903 — 3 arches de 15m

Culée Givors

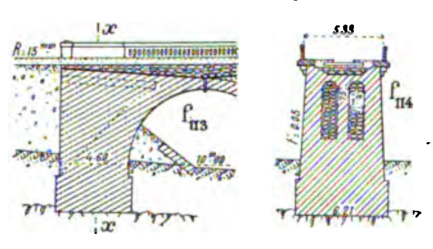


Viaduc du Bandiat

Le Quéroy-Nontron, 1882-83

3 arches de 20m50, 6 arches de 10m

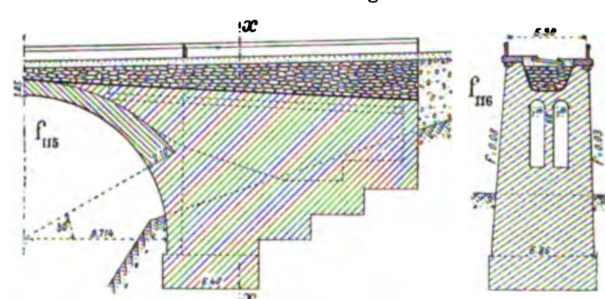
Culée Le Quéroy



Viaduc de Barajol

Bort-Neussargues, 1903-05 — 12 arches de 20m

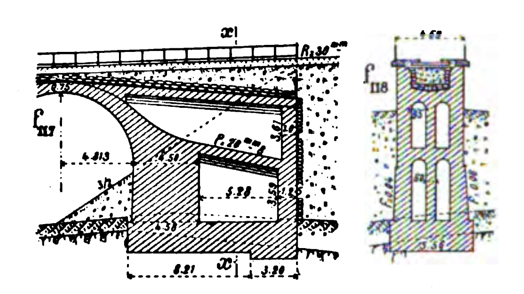
Culée Neussargues



Viaduc de Salsignac

Bort-Neussargues, 1903 — 14 arches de 10m

Culée Neussargues

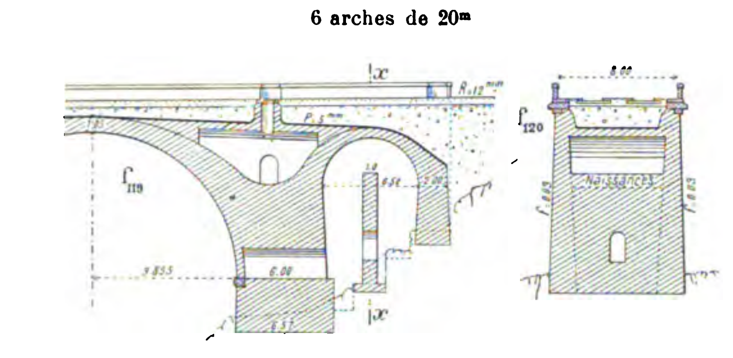


Culées élégies par des voûtes transversales cachées

Coupes en long snr l'axe et coupes en travers sur xx des coupes en long — 2mm

Viaduc du Piou — *Mende-Séverac* — 1878

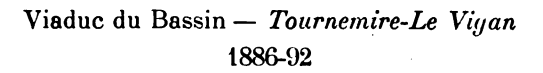
6 arches de 20m



Viaduc de Bramefond — *St-Denis-Le Buisson* — 1881-82

14 arches de 17m

Culée Le Buisson



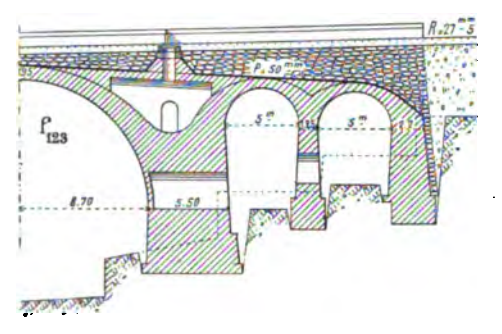
Viaduc de Sénouard

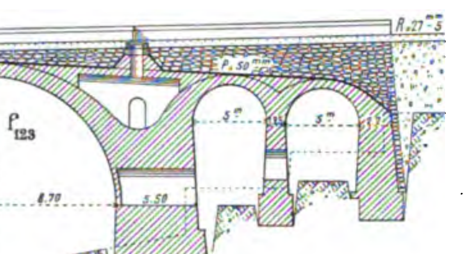
Marvejols-Neussargues — 1879-82

9 arches de 18m

Culée Neussargues



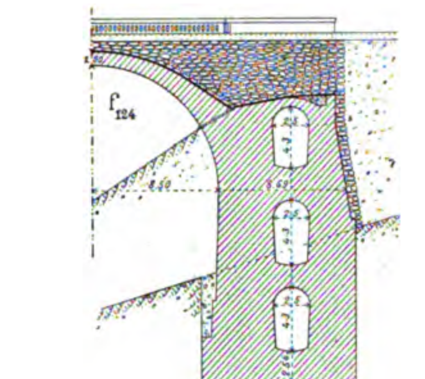


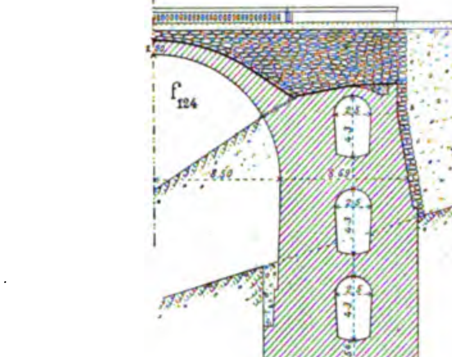


Viaduc de St-Germain-les-Belles

Limoges à Brive par Uzerche, 1887-91

14 arches de 17m — Culée Brive

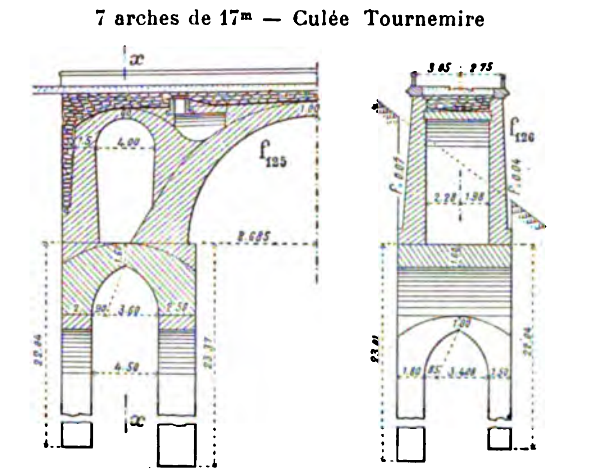




Viaduc du Bassin — *Tournemire-Le Vigan*

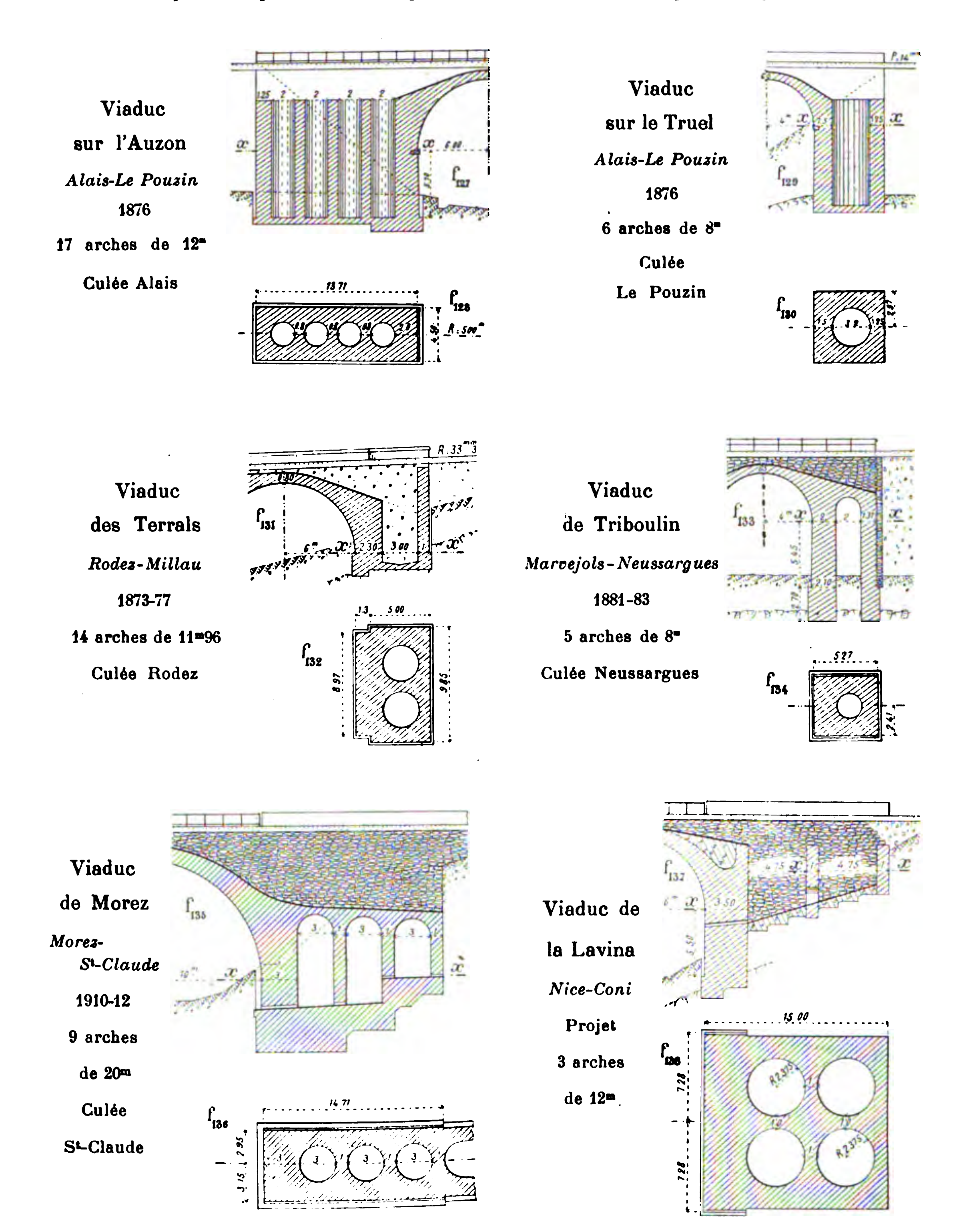
1886-92

7 arches de 17m — Culée Tournemire



Culées évidées par des puits verticaux

Coupes en long sur l'axe et coupes horizontales sur xx des coupes en long — 2mm



Viaduc sur l'Auzon
Alais-Le Pouzin
1876
17 arches de 12m
Culée Alais

Viaduc sur le Truel
Alais-Le Pouzin
1876
6 arches de 8m
Culée Le Pouzin

Viaduc des Terrals
Rodez-Millau
1873-77
14 arches de 11m96
Culée Rodez

Viaduc de Triboulin
Marvejols-Neussargues
1881-83
5 arches de 8m
Culée Neussargues

Viaduc de Morez
Morez-St-Claude
1910-12
9 arches de 20m
Culée St-Claude

Viaduc de la Lavina
Nice-Coni
Projet
3 arches de 12m.

COMMENT ON ÉVACUE L'EAU QUI TOMBE SUR LES VIADUCS

§ 1. — *CHAPES*

Art. 1. — Deux chapes sur les voûtes : la première de 3cm, en mortier de chaux ; la deuxième, de 1cm5, en asphalte.

Une bonne chape doit être imperméable.

Mais, pour qu'elle demeure telle, elle doit aussi être un peu élastique, se prêter, sans se fissurer[99], aux mouvements des voûtes sous les surcharges ou aux changements de température.

Elle sera ainsi constituée : d'abord une première chape de 3cm en mortier de chaux gâché sec et fortement « massivé »[100] ; dessus, une deuxième chape de 1cm5 en asphalte [101, 102].

Quand l'extrados des voûtes est trop irrégulier, on l'unit avant de le « chaper », par une première couche de béton fin de 5 à 6cm.

Art. 2. — Comment on empêche l'eau d'entrer sous la chape par ses bords.

f139 A f140

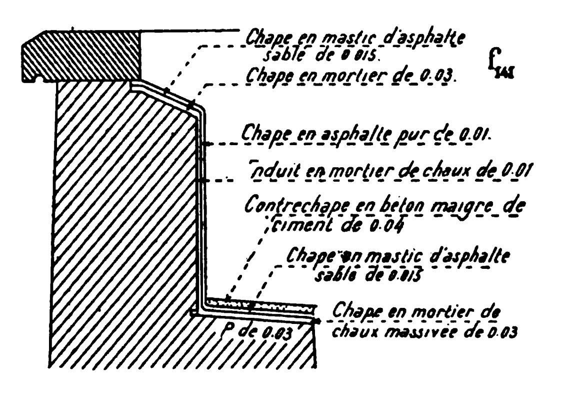
Il ne suffit pas qu'une chape soit imperméable : il faut encore que l'eau ne puisse pas entrer dessous par ses bords, par exemple par A de f_{139} : une goutte d'eau, si elle entre, traversera les maçonneries.

Il faut tout au moins l'engager dans une rainure creusée dans le tympan (f_{140}).

Mieux, on remontra la chape en asphalte le long des parements et on l'engagera sous la plinthe (f_{141}).

Pour qu'elle s'applique bien et tienne sur les parements verticaux, on la fait en asphalte pur, sans sable, et on l'étend sur un enduit de 0m01 en mortier de chaux lissé à la « taloche » [103].

Art. 3. — Contre-chape pour protéger la chape.



Pour protéger une chape en asphalte, ne conviennent : ni l'argile, qui arrête l'eau ; ni le sable qui, à la longue, disparaît, entraîné par l'eau ; ni les pierres plates, qui égratignent la chape.

Le mieux paraît être une couche de 0m04 de béton très maigre : 100k de ciment par m. c. de « gravillon » bien lavé, sans sable[104].

Cette contre-chape est très poreuse, — l'eau la traverse immédiatement, — et très résistante. Elle porte sans s'écraser le remplissage et les surcharges : sur des surfaces très inclinées, elle empêche l'asphalte de couler.

99. — Pas de chape en ciment ; le ciment a du retrait et se fendille.

100. — 350k de la meilleure chaux par m. c. de sable, et 100 litres d'eau seulement. Sur l'extrados, lavé, puis épongé, mais encore humide, on applique le mortier, à l'état de sable humide ; ensuite, on le bat à la savate jusqu'à ce que l'humidité paraisse à la surface. Pour l'empêcher de sécher trop vite, on le recouvre de sable qu'on enlève après la prise.

101. — En deux couches de 7mm5. La 1re est en mastic d'asphalte ; la 2e est faite de deux parties de mastic et une partie de sable lavé et sec. Pour les deux couches, on ajoute au mastic 7% de son poids de bitume.

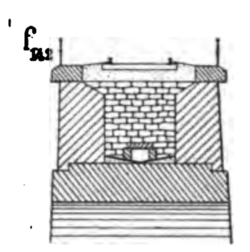
102. — On a essayé quantité de matières : feuille de plomb entre 2 cartons bitumés (isolateur Siebel) ; asphalte armé par de la toile de jute (chape Leiss-Zuffer, appliquée sur les grandes voûtes des Alpes autrichiennes, II, p. 164) ; toile de jute enduite de bitume (« Callendrite », du nom de Callender, son fabricant, — nous l'avons employée au viaduc du Crêt-Morez-St-Claude) ;....

103. — Bouclier en bois avec un manche.

104. — La Cie de l'Est a employé avec succès ce procédé pour refaire la chape du viaduc de Chaumont. Elle l'applique systématiquement à ses nouveaux ouvrages.

Art. 4. — Pentes de la chape, et drains pour conduire rapidement l'eau à des points bas.

Il faut, le plus vite possible, conduire l'eau à des points bas, puis dehors. En travers, on crée, avec de la maçonnerie ou plus simplement du béton maigre, deux pentes de 0,03 à 0,05 vers un petit drain en pierres sèches de 0m20 × 0m20 (f_{142}) : il a, en long, le plus de pente possible, au moins 0,05.



Art. 5. — Comment on fait passer l'eau à travers les voûtes[105].

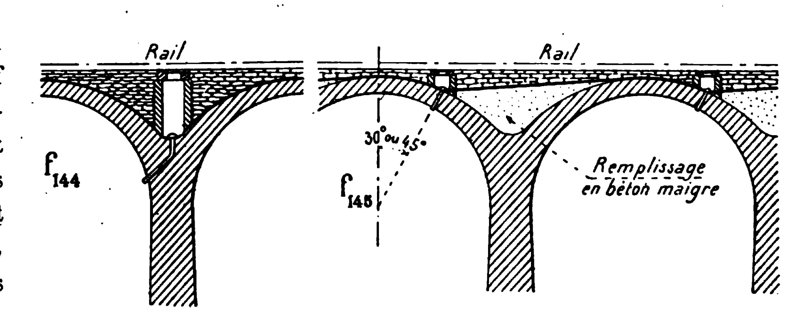
A. — Par la clef. — Ce semble plus simple (f_{143}) : le tuyau est vertical, aussi court que possible ; les eaux ne sont pas rejetées par le vent sur la douelle.

Mais, pour donner aux chapes des pentes longitudinales suffisantes, on augmente, aux dépens de l'aspect, l'épaisseur entre le rail et l'intrados des voûtes à la clef.

Sur des viaducs à très grande pente, on a quelquefois conduit toute l'eau jusqu'à la culée la plus basse ; c'est une erreur : un petit barrage de ballast terreux arrête l'eau. Il faut, au moins, un écoulement par voûte.

B. — Par les reins. — C'est le meilleur mode d'écoulement.

On a quelquefois posé directement la chape sur les extrados des voûtes (f_{144}) : ses points bas sont alors sur les axes des piles ; ils sont mieux entre 30° et 45° de la clef (f_{145}) ; l'eau est moins facilement jetée par le vent sur la douelle ou sur les piles ; la gargouille est plus courte, plus inclinée, le puits de visite moins haut.



Art. 6. — Cas de tympans évidés.

On ne fait de chape que sur les voûtes d'élégissement.

Art. 7. — Il est extrêmement important de bien faire les chapes.

L'eau, petit à petit, enlève la chaux des mortiers.

Dans des ponts à beaucoup de joints, en particulier dans des voûtes en briques, elle a produit de véritables crevasses, parce que le mortier des joints avait disparu, que des briques étaient tombées et que d'autres, constamment imbibées d'eau, avaient gelé.

C'est la chape qui conserve les ouvrages[106].

105. — On a, autrefois, conduit l'eau par un tuyau vertical placé dans l'axe des piles à un petit aqueduc traversant le pied des piles.

Pour de hauts viaducs, on avait des tuyaux très longs, impossibles à visiter, fort difficiles à déboucher. Ce dispositif n'est plus appliqué.

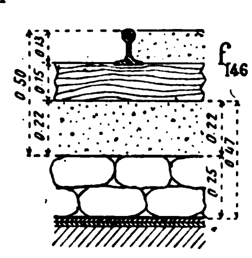
106. — V, p. 193.

Art. 8. — Remplissage au-dessus de la chape.

A. — *Nature.* — Voir plus haut Chap. VII, § 2, art. 2.

B. — *Epaisseur au-dessus des clefs.* — Elle doit garantir sûrement la chape contre toute détérioration au passage des trains ou par les outils des poseurs.

Mais un matelas épais augmente, aux dépens de l'aspect, la hauteur du tympan entre la plinthe et le bandeau : on ne dépassera pas 0m40.



C'est encore trop pour l'aspect des viaducs à petites arches (8m et au-dessous) : on pourra réduire l'épaisseur du matelas à 0m30 et même à 0m25 (soit sous traverses 0m47 f_{146}), à condition de le faire en maçonnerie à pierres sèches [107, 108].

Art. 9. — Parements cachés, non chapés.

Tous les parements cachés, non chapés, doivent être lavés, brossés, nettoyés, puis barbouillés de trois couches de coaltar.

§ 2. *GARGOUILLES.*

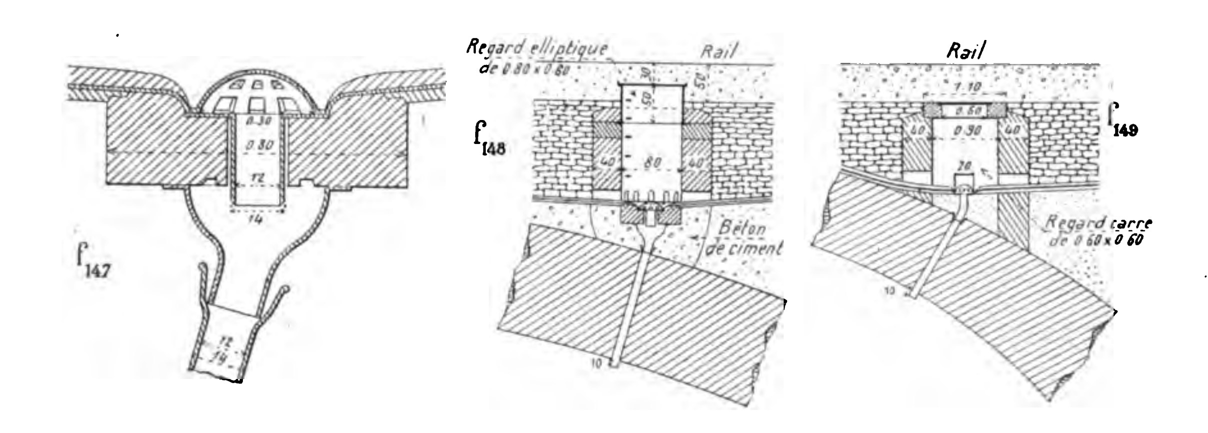
Pour visiter les gargouilles, on établit des regards (f_{148}, f_{149}) dans l'axe de la voie sur les viaducs à une voie, dans l'axe de l'entrevoie sur les viaducs à deux voies.

On les coiffe d'une crépine pour empêcher les graviers de passer au travers et les grosses pierres de les engorger (f_{147}).

On les fait dépasser d'au moins 0m10 l'intrados pour que l'eau ne soit pas rejetée par le vent sur la douelle : on « biseaute » l'about pour qu'elle tombe de suite.

Il faut empêcher l'eau de s'introduire entre la maçonnerie et la gargouille.

Voici quelques dispositifs (f_{147}, f_{148}, f_{149}) :



107. — Voir plus haut p. 21.

108. — Le matelas n'est que de 0m30 aux ponts de Lavaur et Antoinette. Les chapes n'ont pas souffert. A de petits ouvrages n'ayant sous les traverses qu'un matelas de 0m15, le Service de la Voie de la Cie d'Orléans n'a pas constaté d'avarie dans les voûtes (p. 21).

MATÉRIAUX

§ 1. — *LEUR RÉPARTITION USUELLE DANS LES DIFFÉRENTES PARTIES DU VIADUC*[109]

Désignation			Dimensions usuelles (f_{150}) — En parement — Hauteur ou Épaisseur h	En parement — Largeur l	Queue q	Retour d'équerre — Lits r_1	Retour d'équerre — Joints r_2	Abréviations	Répartition
Maçonnerie de :	moellons ordinaires	en blocage, sans préparation spéciale.	Plus petite dimension $\geqslant 0^m10$ Poids $< 40^k$					MO	Toutes les maçonneries de moellons à mortier, sauf celles qui sont spécifiées ci-dessous : gros œuvre ; remplissages ; massifs de fondation ; noyaux des piles ; corps des culées, des tympans ; parements cachés.
	moellons ordinaires choisis, (c'est-à-dire avec sujétion.)	en parement. à joints incertains.	Plus petite dimension $\geqslant 0^m10$		$\geqslant 0^m20$	$\geqslant 0^m10$	$\geqslant 0^m10$	MOI ou MOH suivant la carrière	Parements vus des tympans, des piles, des culées sauf les angles ; parements intérieurs des regards de visite.
		en parement. par assises horizontales grossières.	$\geqslant 0^m10$		$\geqslant 0^m20$	$\geqslant 0^m15$	$\geqslant 0^m10$		
		en voûte. méplats, « lités » ; les lits prolongeant soit chaque lit de douelle, soit un lit sur 2, sur 3.	Plus petite dimension $\geqslant 0^m10$			aussi pleins que possible	0^m10	MOV	Queutage des grandes voûtes[110] derrière la douelle au-dessus du quart de la montée à partir des naissances ; douelle et queutage des voûtes d'élégissement.
	moellons à face rectangulaire, les 4 arêtes dans un même plan (f_{150})	moellons équarris par assises horizontales	$\geqslant 0^m15$ $\leqslant 0^m25$	1.5 h à 2.5 h	$\geqslant 0^m30$	0^m20	0^m15	ME	Fûts des parapets. Dans les grands viaducs, parements vus des tympans, des piles, des culées, sauf les angles.
		moellons équarris taillés en voussoirs	Fixée par le dessin $\geqslant 0^m15$ $\leqslant 0^m25$	1.5 h à 2.5 h	$\geqslant 0^m30$	Pleins	0^m20	MEV	Douelle des voûtes.[111]
		moellons d'appareil par assises horizontales	Dimensions indiquées aux dessins			Pleins		MA	Angles des piles, des culées, angles et bahuts des parapets sur culées.
		moellons d'appareil taillés en voussoirs						MAV	Bandeaux des voûtes (p. 54).
	libages.							L	Dés pour sceller les garde-corps entre grands murs de soutènement (p. 49).
	pierre de taille.							PT	Plinthes, sous-plinthes, corbeaux des refuges, couronnement des regards de visite, logement des crépines des gargouilles.
Béton	de chaux.		»					B	En fondation à la place du « MO », s'il coûte sensiblement moins.
	de ciment.							BC[t]	Autour des gargouilles.
	maigre.							BM	Entre tympans sous les chapes ; radiers des puits des culées.
Chapes et enduits.	Chape de 0^m03 d'épaisseur en mortier de chaux massivé.		»					»	Extrados des voûtes, revers d'eau des tympans et des murs en retour, radier des puits des culées.
	Enduit de 0^m01 d'épais[r] en mortier de chaux taloché.		»					»	Parements cachés des tympans.
	Enduit de 0^m02 d'épaisseur en mortier de ciment.								Sur l'extrados des grandes voûtes sous les voûtes d'évidement.
	Chape de 0^m015 d'épaisseur en asphalte.		»					»	Sur les chapes en mortier de chaux de 0^m03 et sur l'enduit en mortier de chaux derrière les tympans.
	Contre-chape de 0^m04 d'épaisseur en béton maigre de gravillon et de ciment (p. 79) (100^k de ciment pour 1^{mc} de gravillon sans sable).		»					»	Sur la chape en asphalte des voûtes.
	3 couches de coaltar.		»					»	Tous les parements cachés non recouverts d'une chape en asphalte.
	Pierres sèches rangées à la main.		»					PS	Entre tympans au-dessus des chapes ; chemises derrière les culées et les murs en retour ; remplissage des puits des culées quand ils ne sont pas couverts par des voûtes.

109. — Donnée pour les maçonneries des Grands ouvrages Tome V, p. 7.
110. — V, p. 18, 19. 111. — V, p. 18.

§ 2. — *QUELQUES DÉTAILS D'APPAREIL*

Art. 1. — Douelle des voûtes[112].

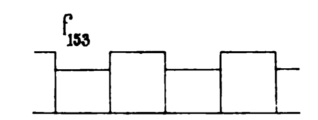
Les moellons équarris (MEV) ont leurs lits dressés normalement à la douelle sans démaigrissement sur toute leur longueur, leurs joints retournés d'équerre sur $0^{m}25$ au moins.

Tous les MEV d'une même assise ont la même queue. Il y aura toute une assise courte, — puis toute une assise longue.

La découpe, de $0^{m}10$ au moins, est d'une assise à l'autre, et non entre deux moellons d'une même assise.

Une coupe suivant xx de f_{151} sera f_{152} et non f_{153}.

Avec f_{152}, on lie beaucoup mieux la douelle à son queutage.



Art. 2. — Assises de libages coupant les piles.

On a souvent coupé les hautes piles, tous les 8 à 10^{m}, par des assises de libages[113].

Elles ont pour objet de mieux répartir la pression et d'arrêter, s'il s'en produisait, une fissure verticale[114].

On a fait, sans assises de libages, de très grandes piles avec parements, soit assisés[115], soit à joints incertains[116].

Peut-être ne sont-elles utiles que dans les très hauts viaducs à parements non assisés, tout entiers en moellons ordinaires, surtout en béton[117]; peut-être pourrait-on les y remplacer par des assises en béton armé[118].

112. — V, p. 18.

113. — Viaduc de la Fure, projeté en 1855 par Tony Fontenay (Ligne de Lyon à Grenoble).
Viaduc de Mussy (Ligne de Paray-le-Monial à Givors, 1892-1895): les libages des assises y sont cramponnés les uns aux autres.
On en a mis tous les 10^{m} environ aux viaducs des lignes de Coire à Saint-Maurice (Albula Bahn. *Denkschrift im Auftrage der Rhätischen-Bahn,* zusammen gestellt von Profr-Dr Hennings, — Coire 1908); et du lac de Constance à celui de Zurich (Bodensee-Toggenburg-Zürichsee-*Denkschrift über die Eisenbahn Verbindung Romanshorn St-Gallen-Wattwill-Uznach*, Saint-Gall, 1911, p. 94, Pl. 8, 9) ;
à ceux des nouvelles lignes des chemins de fer Rhétiques : Ilanz-Disentis et Bevers-Schuls, *Schweiz. Bauzeitung, 20 avril et 4 mai 1912;*
au viaduc de Castieler de la ligne de Coire à Arosa, *Schweiz. Bauzeitung, 19 juin 1915.*

114. — On a dit que les « assises de liaison », qui, elles, ne « soufflent » pas, retiennent par frottement les autres maçonneries et frettent la pile.

115. — Pompadour (Brive à Limoges) $H'=55^{m}$, Saint-Laurent (Séverac à Marvejols) $H'=53^{m}$, La Crueize (Marvejols à Neussargues) $H'=63^{m}$, Les Fades (Saint-Eloi à Pauniat) piles de 92^{m} sous travées métalliques.

116. — La Gascarie (Carmaux à Rodez) $H'=49^{m}$, Arquejols (Le Puy-Langogne) $H'=45^{m}$.

117. — Comme on coupe par des assises de briques des maçonneries de galets.

118. — Tranches armées de piles de viaducs construits par M. l'Ingénieur en Chef Harel de la Noë.

§ 3. — *PAREMENTS*

Art. 1. — Façon.

A. — Taille plate.

On n'emploiera la taille plate que dans des villes ou quand la pierre ne permettra pas d'obtenir de bons bossages.

Les faces plates seront striées et non picotées dans tous les sens. Les stries de taille seront régulièrement espacées et toutes inclinées à 45°. Dans un ouvrage, les stries seront dans le même sens.

La pierre de taille des viaducs courants (plinthes, refuges), ne sera pas bouchardée, mais dressée à la pointe.

On ne bouchardera que le dessus des plinthes, parce qu'il sert de trottoir : des stries peuvent retenir l'eau, qui gèlerait en hiver.



Φ_4. — Viaduc du Caty[119]
taille plate



Φ_5. — Viaduc des Planches[120]
bossages

B. — Bossages.

Les grandes surfaces plates sont ennuyeuses : il faut les accidenter, les égayer par des bossages (Φ_5).

Les moellons des piles et des bandeaux auront des bossages de 0m03 ou 0m04 ; ceux des culées, des bossages de 0m05 à 0m06 en moyenne ; — plus même, entre de grands rochers.

On a presque toujours taillé plats les moellons de douelle pour qu'ils s'appuient bien sur le cintre. Une douelle plate est désagréable au-dessus de piles à bossages : on y peut très bien accepter un léger bossage de 0m02 qui impose peu de sujétion.

C. — Ciselures.

On n'entourera jamais d'une ciselure la face d'un moellon, même les moellons d'angles ; on n'en fera que pour bien dresser les arêtes des piles, des culées, de l'intrados du bandeau ; elles auront, sur chaque face, 0m02 à 0m03 de largeur.

Art. 2. — Couleur.

On emploiera les mêmes matériaux dans toutes les parties du viaduc. S'il en faut employer de couleurs différentes, on les distribuera au mieux pour l'aspect : des bandeaux en pierre sombre font parfois bien.

On ne fera pas d'arêtes de piles en «MA» noirs ou blancs encadrant des ME, des MO blancs ou noirs.

119. — Montauban à Castres 1883-85.

120. — Lozanne à Givors 1902-05. Le cordon et les corbeaux des naissances sont de trop.

Art. 3. — Piles et tympans.

Pour les viaducs courants, les parements des piles et tympans seront, suivant les carrières, en moellons ordinaires de choix à joints incertains (MOI), ou par assises (MOH).

Φ_6. — Viaduc d'Arquejols[121]
Tympans et piles en « MOI ».



Φ_7. — Viaduc de Morez[122]
Tympans, piles, douelles en ME *à bossages.*



Pour la stabilité d'un très grand viaduc, on pourra les faire en moellons équarris (ME).

Mais, dans tous les cas, les tympans et les piles (tout au moins leurs faces en élévation) seront parementés avec les mêmes matériaux, c'est-à-dire tous deux en MOH ou tous deux en MOI, ou tous deux en ME. Si l'on n'avait pas assez de l'un des matériaux pour faire tous les parements, on ferait en MOH les piles, en MOI les tympans, — autant que possible, de même couleur. Peut-être conviendrait-il alors d'accepter, malgré qu'on en eût, un cordon aux naissances pour les séparer, parce qu'il est choquant de mettre l'une au-dessus de l'autre deux maçonneries différentes, sans les séparer par quelque chose. Ceci ne s'applique qu'aux piles très épaisses, aux naissances desquelles il y a un grand intervalle entre les extrados des bandeaux.

Les angles des piles et des culées ne se distingueront en rien des parements voisins : mêmes bossages, même aspect, même carrière, même couleur... Si les faces étaient en MOI, les angles resteraient en MA, mais taillés de façon à ne pas trop se distinguer des MOI (Φ_6)

Les angles n'auront *jamais* de saillie sur les parements qu'ils encadrent : elle rend confus l'aspect de l'ouvrage. Si on les fait en gros matériaux (libages, pierres de taille), on prépare des lézardes : c'est mauvais, laid, cher.

Art. 4. — Culées.

Il convient que les murs en retour soient plus rustiques, plus vigoureux que les tympans.

On y pourra mettre des moellons assisés à bossages à côté de tympans en « opus incertum » plat qui est moins ferme ; on a même, à côté de tympans en moellons assisés, revêtu des culées en « opus incertum » ; mais il y faut de gros moellons et de gros bossages.

121. — Langogne au Puy 1905-12, arches de 16m, Hr maxima 49m.

122. — Morez-St-Claude 1908-12, arches de 20m, Hr maxima 40m50. On n'en imitera pas les évidements.

TITRE II

DISPOSITIONS SPÉCIALES AUX VIADUCS EN COURBE

CHAPITRE I

VOÛTES EN BERCEAU — TRACÉ DES TYMPANS

§ 1. — *TYMPANS A FACETTES*

CHAQUE FACETTE PLANE ET PARALLÈLE A LA CORDE DU TRACÉ SUR LA PORTÉE DES ARCHES, OU SUR LA LARGEUR DES PILES

Menons deux arcs concentriques au tracé, à $\frac{l}{2}$ de part et d'autre (f_1). Les polygones $A_1\,C_1\,E_1\,G_1$ inscrit dans l'arc concave, $A_2\,C_2\,E_2\,G_2$ enveloppant l'arc convexe, sont des horizontales des deux tympans.

La section des piles aux naissances est un trapèze ; sa largeur est :

sur l'axe, e_s,

et très approximativement :

sur la face concave

$e_s - l \sin \psi$

sur la face convexe

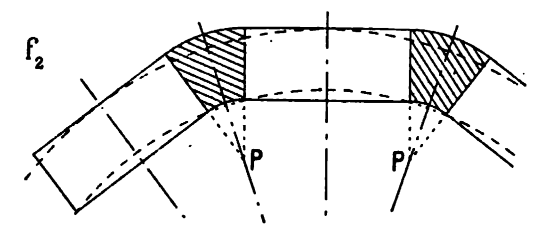
$e_s + l \sin \psi$

La différence d'épaisseur des deux faces est $2l \sin \psi$.

La voûte est en berceau sur le rectangle $C_1\,E_1\,C_2\,E_2$.

Les bandeaux sont plans.

La largeur des voûtes entre têtes est augmentée de la flèche $f = \frac{r^2}{2R}$



Les tympans présentent une suite de facettes d'aspect peu agréable quand, — ce qui est le cas général, — elles ne sont pas dissimulées par des contreforts.

En exécution, on arrondit les angles. On peut aussi tracer les faces des piles suivant deux arcs de cercle de centre P (f_2)[1]

Malgré ses défauts, c'est ce système qui a été le plus employé.

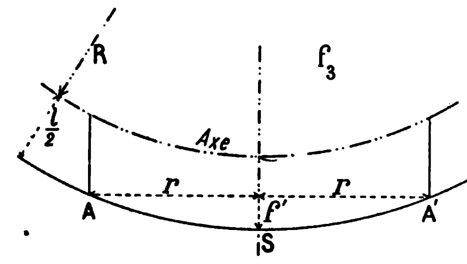
1. — Viaduc de Morez (Ligne de Morez à Saint-Claude), 1909. $2r = 20^m$, $e_s = 4^m624$, $R = 250^m$.

§ 2. — TYMPAN CONVEXE EN COURBE

AVEC UN FRUIT SUFFISANT POUR QUE LA CLEF NE SOIT PAS EN PORTE-A-FAUX PAR RAPPORT A UN AUTRE POINT DE L'INTRADOS

Art. 1. — Nécessité de ce fruit.

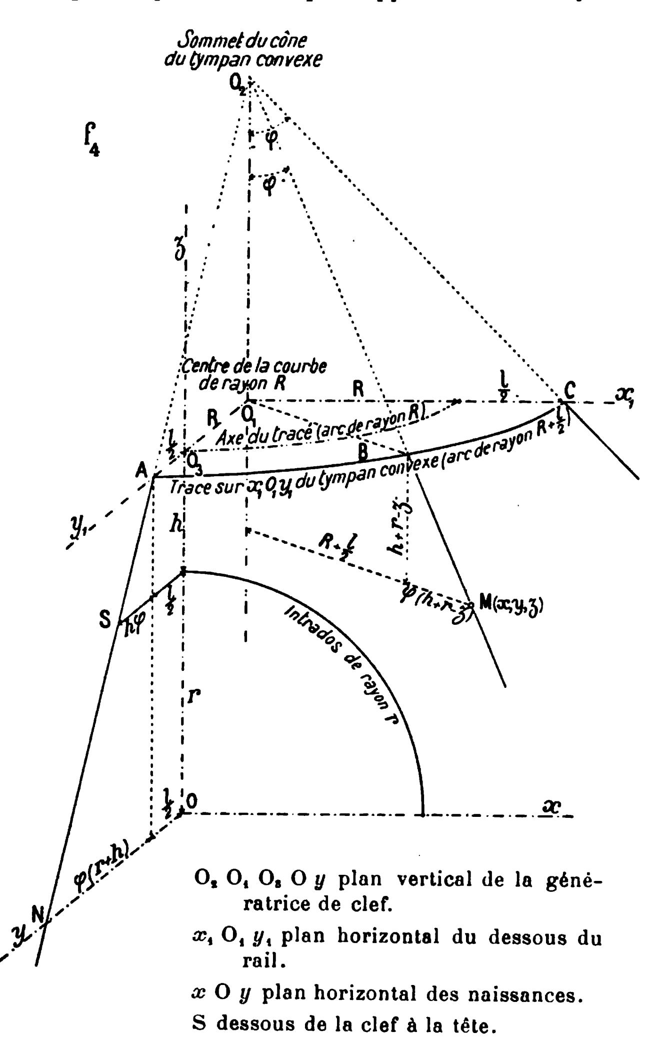
Si le tympan convexe était dressé suivant un cylindre ayant comme rayon $R + \frac{l}{2}$ (f_3), le bandeau serait tout entier en porte-à-faux par rapport à la corde AA'. Le porte-à-faux est maximum à la clef ; il y est :



$$f' = \frac{r^2}{2R + l} \text{ ou, à très peu près : } \frac{r^2}{2R}$$

Pour le réduire, on donne du fruit au tympan, fruit qui, d'ailleurs, résiste au renversement des murs de tête sous l'action de la force centrifuge.

Cherchons le fruit minimum à adopter pour que, à l'intrados du bandeau convexe, la clef ne soit pas en porte-à-faux par rapport à un autre point.



O_2 O_1 O_3 O y plan vertical de la génératrice de clef.

x_1 O_1 y_1 plan horizontal du dessous du rail.

x O y plan horizontal des naissances.

S dessous de la clef à la tête.

Art. 2. — Surface conique du tympan convexe.

A. — Définition.

Soit O_1 (f_4), le centre de la courbe du tracé.

Dans le plan horizontal de O_1, traçons l'arc ABC de rayon $R + \frac{l}{2}$, dressons le parement du tympan convexe suivant un cône de révolution dont l'axe est la verticale du centre O_1, et dont les génératrices ont le fruit φ.

B. — Intersection de la surface conique du tympan convexe avec la douelle de la voûte.

Ses équations sont (axes Ox, Oy, Oz, plan des naissances xOy, f_4) :
cône du tympan

$$x^2 + (y + R)^2 = \left[R + \frac{l}{2} + \varphi\,(h + r - z)\right]^2$$

cylindre de douelle

$$x^2 + z^2 = r^2$$

C. — Projection de cette intersection sur le plan vertical de la génératrice de clef (f_5, f_6).

Eliminons x^2

$$z^2-(R+y)^2+\left[R+\frac{l}{2}+\varphi(h+r-z)\right]^2-r^2=0$$

hyperbole à axes vertical et horizontal. Son inclinaison sur la verticale est :

$$\text{Tang}\ \psi=\frac{z-\varphi\left[R+\frac{l}{2}+\varphi(h+r-z)\right]}{R+y}$$

au sommet S $\quad z=r \quad y=\frac{l}{2}+\varphi h$

$$\text{Tang}\ \psi_s=\frac{r}{R+\frac{l}{2}+\varphi h}-\varphi \qquad \text{soit, en négligeant } \frac{l}{2}+\varphi h \text{ devant R, } \quad \frac{r}{R}-\varphi$$

aux naissances N $\quad z=0 \quad y=\frac{l}{2}+(r+h)\varphi-f'$ $\left(\text{flèche du tracé sur la corde } 2r=\frac{r^2}{2R}\right)$

$$\text{Tang}\ \psi_N=-\varphi\frac{R+\frac{l}{2}+(r+h)\varphi}{R+\frac{l}{2}+(r+h)\varphi-f'}$$

soit pratiqt φ, fruit de la génératrice du tympan.

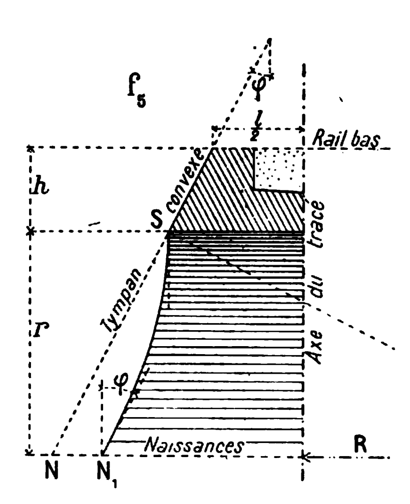
Si l'intrados est une ellipse de portée $2a$, de montée b, on trouve :

$$\text{Tang}\ \psi_s=\frac{a^2}{b}\left(\text{rayon de courbure à la clef}\right)-\varphi$$

Si c'est un arc de rayon r, $\quad \text{Tang}\ \psi_s=\frac{r}{R}-\varphi$

Art. 3. — Condition pour qu'il n'y ait pas de porte-à-faux

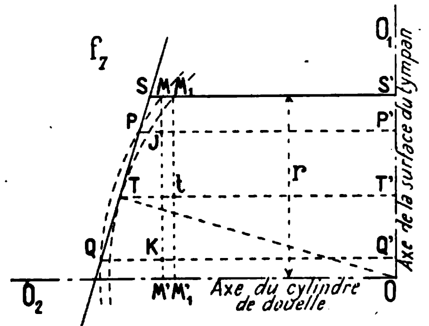
A. — La coupe en travers du tympan est une droite de fruit φ. *Il faut :* $\varphi \geqslant \frac{r}{R}$



Pour qu'il n'y ait pas de porte-à-faux, il suffit que la tangente à la clef soit verticale, c'est-à-dire que la clef soit le sommet de l'hyperbole, laquelle sera ainsi tout entière d'un même côté par rapport à cette tangente verticale (f_5).

$$\text{Soit } \varphi \geqslant \frac{r}{R} \quad [2]$$

(r rayon de l'intrados s'il est en plein cintre ou en arc, rayon de courbure au sommet s'il est en ellipse).

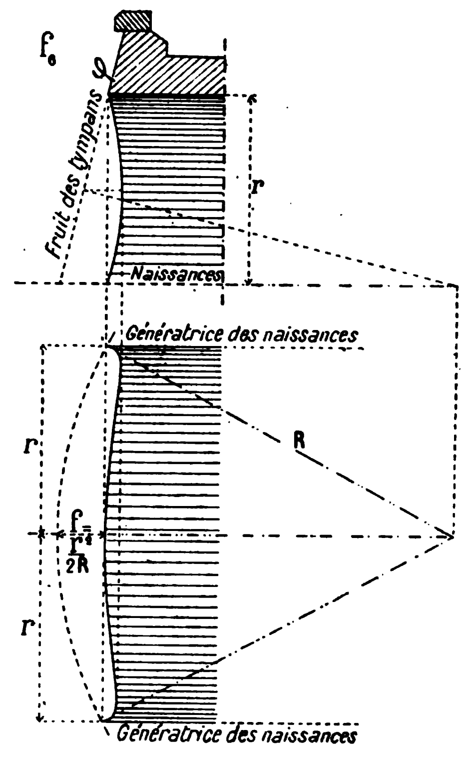


2. — En construisant l'intersection, on retrouve cette règle.

Soient : OO_2 l'axe du cylindre de douelle, OO_1 celui du cône du tympan (f_7). Une sphère de centre O coupe le cône suivant deux circonférences PP', QQ', la douelle suivant MM' : J et K sont deux points de l'intersection.

Abaissons de O la perpendiculaire OT. La sphère de rayon OT coupe le cône suivant la circonférence TT' (les deux circonférences PP', QQ' sont réduites à une), la douelle suivant $M_1 M'_1$. Ces deux lignes se coupent en t.

$M_1 M'_1$ est la tangente verticale à la projection de l'intersection, laquelle projection est tout entière à sa gauche. Ce qui est au-dessus du point t est en porte-à-faux. Le point t doit donc être au sommet S ou plus haut : $\varphi \geqslant \frac{r}{R+\frac{l}{2}+\varphi h}$, pratiquement $\geqslant \frac{r}{R}$



On s'est quelquefois borné à supprimer le porte-à-faux de la clef, non sur tout autre point, mais seulement sur les naissances (f_6).

Il suffit alors d'un fruit qui place la clef sur la verticale des naissances :

$$\varphi \times r \text{ (montée)} \geqslant \frac{r^2}{2R} \text{ (flèche)}$$

$$\text{ou } \varphi \geqslant \frac{r}{2R}\ ^{3}$$

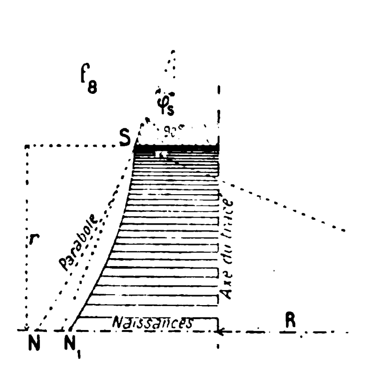
C'est la moitié du fruit précédent ; mais la clef est en porte-à-faux par rapport aux reins.

B. — La coupe en travers du tympan convexe est une parabole. — Soit φ_s son fruit au niveau du sommet de la voûte. Il faut : $\varphi_s \geqslant \frac{r}{R}$

Le tympan est une surface de révolution ayant pour axe la verticale du centre du tracé et pour méridienne, dans le plan vertical passant par l'axe de la voûte, la parabole SN (f_8).

Soit φ_s l'inclinaison sur la verticale de la tangente à cette parabole au niveau du sommet de la voûte S,

Pratiquement,



SN_1, projection de la courbe de tête, est

en S, verticale pour $\varphi_s = \frac{r}{R}$

en N_1, parallèle à la parabole en N.

Art. 4. — Tracé du tympan convexe suivant le rapport $\frac{r}{R}$.

A. — Table de $\frac{r}{R}$.

La table T_4 (Appendice 3e partie) donne φ pour $2r$ (portée) de 4m à 60m, et R (rayon du tracé) de 150m à 800m.

Le fruit de 60mm est un peu fort : on l'acceptera plutôt que de briser les tympans. Mais, en dépit de quelques exemples contraires, on ne le dépassera pas ; un fruit plus grand est disgracieux ; de plus il oblige à donner au moins le même fruit initial aux piles, et ainsi augmente inutilement leur cube.

B. $\frac{r}{R} \leqslant 60^{mm}$.

On dressera le tympan convexe suivant une surface de révolution ayant pour axe la verticale du centre du tracé et pour méridienne :

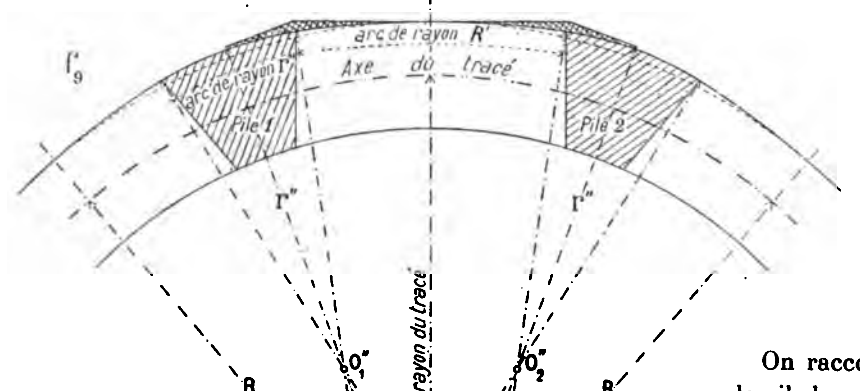
soit une droite de fruit φ tel que : $\frac{r}{R} \leqslant \varphi \leqslant 60^{mm}$

soit une parabole dont la tangente sous la plinthe ait ce même fruit.

On choisira d'après les règles données p. 68 pour les viaducs en alignement droit.

3. — C'est ce qu'a fait M. Barrand, alors Ingénieur en chef, au viaduc de Revigny (arches de 12m, en courbe de 100m, Tramway de Lons-le-Saulnier à St-Claude et à Orgelet).

C. $\frac{r}{R} > 60^{mm}$



Pour rayon en plan du tympan convexe, sur la portée de chaque voûte, on prend. non plus le rayon R du tracé, mais le rayon plus grand R', tel que :

$$\frac{r}{R'} = \varphi' = 60^{mm}\ [4]$$

On raccorde sur la largeur de la pile les courbes de rayon R' de deux voûtes voisines (même rayon R', mais centres différents) par un arc de rayon r'', de centre O'' (f9).

C'est d'un meilleur aspect que les tympans à facettes (p. 86), et moins cher du volume indiqué par des hachures croisées.

§ 3. — *TYMPAN CONCAVE EN COURBE*

On pourrait le dresser suivant un cylindre vertical ayant comme rayon R — $\frac{l}{2}$: il n'y aurait pas de porte-à-faux ; mais il convient pour l'aspect qu'il y ait un peu de fruit.

On le profilera comme il l'eut été en alignement; on en pourra réduire un peu le fruit.

Si en alignement c'eut été un plan de fruit φ', on le dressera suivant un cône (f10) de ce fruit.

Son équation est (axes O'x, O'y, O'z — xO'y, plan des naissances) :

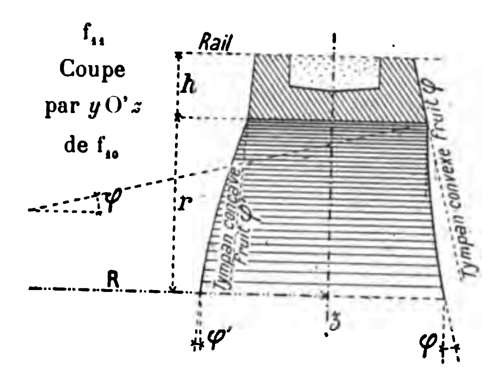
$$x^2 + (R - y)^2 = \left[R - \frac{l}{2} - \varphi'(h \pm r - z)\right]^2$$

celle de la douelle $x^2 + z^2 = r^2$

celle de la projection de leur intersection sur yO'z :

$$z^2 - (R - y)^2 + \left[R - \frac{l}{2} - \varphi'(h + r - z)\right]^2 - r^2 = 0$$

4. — Table T4.



Cette hyperbole est inclinée sur la verticale de :

$$\text{Tang } \psi' = \frac{z + \left\{R - \frac{l}{2} - \varphi'(h + r - z)\right\}\varphi'}{R - y}$$

au sommet S $\quad z = r \quad y = \frac{l}{2} + h\,\varphi'$

$$\text{Tang } \psi_s' = \left[\varphi' + \frac{r}{R - \frac{l}{2}\varphi' h}\right] \quad \text{pratiq}^t\ \varphi' + \frac{r}{R}$$

aux naissances $z = 0 \quad y = \frac{l}{2} + (r + h)\,\varphi'$

$\text{Tang } \psi_N' = \varphi'$

CHAPITRE II

VOÛTES NON EN BERCEAU

AVEC GÉNÉRATRICES DES NAISSANCES

CONVERGEANT AU CENTRE DE LA COURBE DU TRACÉ

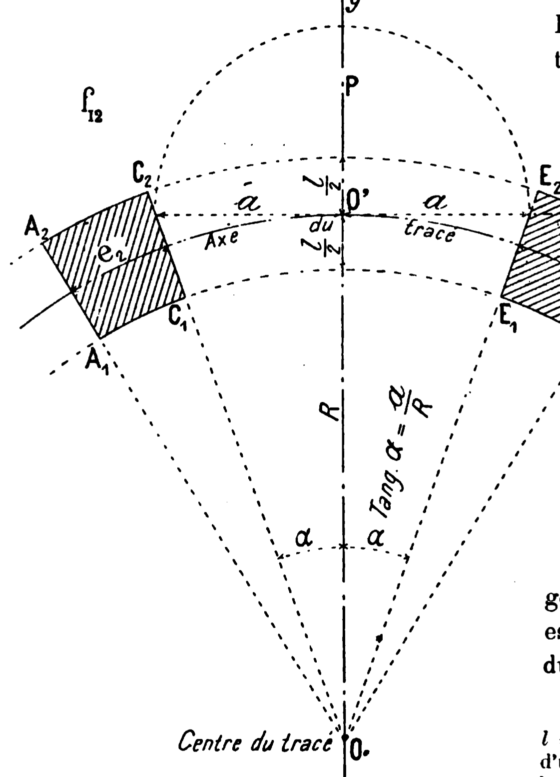
Art. 1. — Avec les voûtes en berceau, il peut y avoir une différence exagérée entre les largeurs d'une pile à chaque tête.

Cette différence (f_1) $E_2\,G_2 - E_1\,G_1$ est $2l \sin \psi$,

soit, à peu de chose près : $\left(1 + \frac{2r \text{ (ou } 2a)}{e_2}\right)\frac{e_2\,l}{R}$

e_2 est très généralement 0,20 ($2r$).

La différence d'épaisseur est $6\,\frac{e_2\,l}{R}$: elle peut être telle que les piles soient à une tête trop grêles, à l'autre trop larges.



On atténue ce défaut en faisant converger $E_2\,E_1$, $G_2\,G_1$ sur la verticale du centre du tracé (f_{12}).

La surface à couvrir par la voûte est le trapèze $C_1\,C_2\,E_2\,E_1$ (au lieu du rectangle $C_1\,C_2\,E_2\,E_1$ de f_1).

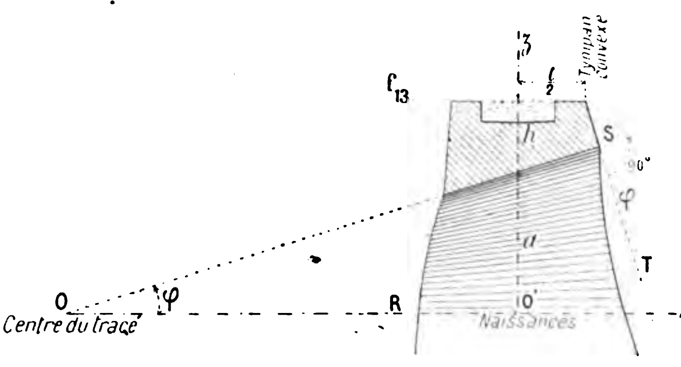
La différence d'épaisseur $E_2\,G_2 - E_1\,G_1$ est $\frac{e_2\,l}{R}$, soit 6 fois moindre [5].

Art. 2. — Douelle en cône.

On peut dresser l'intrados suivant un cône ayant son sommet (f_{12}, f_{13}) au point O où la verticale du centre du tracé perce le plan des naissances, pour axe l'horizontale R.

Si le fruit φ du tympan convexe est $\frac{a}{R}$, la génératrice supérieure du cône d'intrados OS est perpendiculaire à la génératrice du cône du tympan ST (f_{13}).

5. — Soient $2a = 2r = 20^m$, $e_2 = 4^m$, $R = 300^m$, $l = 8^m$. La différence entre les épaisseurs aux 2 têtes d'une pile aux naissances est 0m642 pour la voûte en berceau, 0m107 pour l'autre.



On trouve pour l'équation (axes $O'x$, $O'y$, $O'z$) :

de la surface du tympan convexe :

$$x^2+(R+y)^2=\left[R+\frac{l}{2}+(a+h-z)\varphi\right]^2$$

de la douelle :

$$x^2+z^2=\frac{a^2}{R^2}(R+y)^2$$

de la projection de leur intersection sur le plan $yO'z$

$$(R+y)^2\left(1+\frac{a^2}{R^2}\right)=z^2+\left[R+\frac{l}{2}+(a+h-z)\varphi\right]^2$$

L'inclinaison de cette hyperbole sur la verticale est :

$$\text{Tang }\psi=\frac{z(1+\varphi^2)-\left(R+\frac{l}{2}\right)\varphi-(a+h)\varphi^2}{(R+y)\left(1+\frac{a^2}{R^2}\right)}$$

au sommet S $\quad z=\frac{a}{R}\left[R+\frac{l}{2}+\varphi\frac{h-\frac{l}{2}\frac{a}{R}}{1+\varphi\frac{a}{R}}\right]\qquad y=\frac{l}{2}+\varphi\frac{h-\frac{l}{2}\frac{a}{R}}{1+\varphi\frac{a}{R}}$

Négligeons $\varphi\frac{a}{R}$ et φ^2, puis $\varphi\, h$ devant $R+\frac{l}{2}$

$$\text{Tang }\psi_s=-\frac{R^2}{R^2+a^2}\left(\varphi-\frac{a}{R}\right)$$

Pas de porte-à-faux pour $\varphi\geqslant\frac{a}{R}$, même règle que pour les voûtes en berceau.

aux naissances $\quad z=0\quad y=\left[R+\frac{l}{2}+(a+h)\varphi\right]\frac{R}{\sqrt{R^2+a^2}}-R$

Négligeons les termes en φ^2

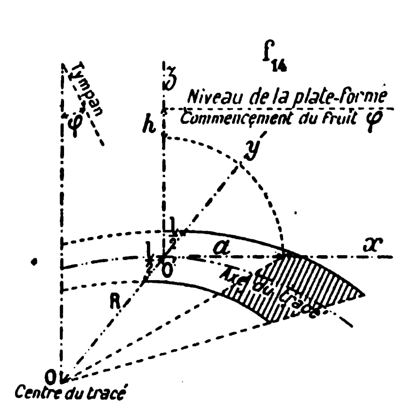
$$\text{Tang }\psi_n=-\varphi\frac{R}{\sqrt{R^2+a^2}}$$

Art. 3. — Douelle en conoïde.

On peut aussi dresser l'intrados suivant un conoïde à génératrices horizontales ayant pour directrices (f_{14}) :

la verticale du centre du tracé ;

le cercle de rayon a situé dans le plan vertical tangent à l'axe du tracé au milieu de l'ouverture de la voûte et ayant son centre au point O', dans le plan des naissances.



On trouve pour l'équation (axes $O'x$, $O'y$, $O'z$) :

du conoïde $$(R+y)^2\,(a^2-z^2)=R^2x^2$$

de la surface du tympan convexe (comme à l'art. 2 ci-dessus)

$$x^2+(R+y)^2=\left[R+\frac{l}{2}+(a+h-z)\varphi\right]^2$$

de la projection de leur intersection sur le plan $yO'z$

$$(R+y)^2\left[1+\frac{a^2-z^2}{R^2}\right]=\left[R+\frac{l}{2}+(a+h-z)\varphi\right]^2$$

L'inclinaison de cette courbe sur la verticale est :

$$\text{Tang}\ \psi=\pm\frac{R\left[R+\frac{l}{2}+(a+h)\varphi\right]}{(R^2+a^2-z^2)^{\frac{3}{2}}}\left[z-\varphi\frac{R^2+a^2}{R+\frac{l}{2}+(a+h)\varphi}\right]$$

ou, négligeant $(a+h)\varphi$ devant $R+\frac{l}{2}$, $$=\pm\frac{R\left(R+\frac{l}{2}\right)}{(R+a^2-z^2)^{\frac{3}{2}}}\left(z-\varphi\frac{R^2+a^2}{R+\frac{l}{2}}\right).$$

z varie de O à a. Pour que Tang ψ ne change pas de signe entre ces 2 limites, il faut :

$$a\leqslant\varphi\frac{R^2+a^2}{R+\frac{l}{2}}\qquad\qquad \varphi\geqslant a\frac{R+\frac{l}{2}}{R^2+a^2}$$

au sommet $z=a$ $$\text{Tang}\ \psi_s=\frac{R^2+a^2}{R^2}\left[a\frac{R+\frac{l}{2}}{R^2+a^2}-\varphi\right]$$

aux naissances $z=o$ $$\text{Tang}\ \psi_n=\frac{R}{\sqrt{R^2+a^2}}\varphi$$ (comme pour la douelle conique)

Pas de changement de signe pour $\varphi\geqslant a\dfrac{R+\frac{l}{2}}{R^2+a^2}$, soit pratiquement $\geqslant\dfrac{a}{R}$

Art. 4. — Sujétions d'exécution.

Les courbes de tête d'amont et d'aval ont des longueurs peu différentes, sauf pour les très grandes ouvertures.

Il n'y aura pas à prévoir d'appareil spécial : les moellons de douelle auront tous la même épaisseur : on fera converger les assises en variant, d'ailleurs de très peu, l'épaisseur des joints[6].

6. — Pour une voûte de 25^m, en courbe de 1250^m, avec 195 assises de 0^m20 environ d'épaisseur, l'épaisseur des joints ne devrait varier, d'une tête à l'autre, que de 4^{mm}.

Toutes les fermes du cintre seront taillées comme la ferme de la tête concave qui est la plus petite ; on augmentera, à la demande, leur développement en clouant des fourrures sur les vaux.

Il n'est pas plus difficile d'exécuter une voûte en cône ou en conoïde qu'en berceau :

Le cône et le conoïde diffèrent très peu, surtout pour les viaducs à une voie.

Art. 5. — Fruit des piles.

On adoptera des fruits droits constants ou des fruits paraboliques, d'après la hauteur totale de l'ouvrage, comme il est spécifié p. 64.

Du côté convexe, comme le fruit des piles doit être au moins égal à celui des tympans, il sera généralement plus grand qu'en alignement droit : c'est d'ailleurs justifié pour résister à la force centrifuge.

Du côté concave, on pourra le réduire un peu. Il n'est pas indispensable d'avoir les mêmes fruits sur les deux élévations. Sans doute, on peut voir en même temps deux arêtes amont et aval d'une pile ; c'est un très léger inconvénient d'aspect pour les viaducs à une voie ; mais de très beaux ouvrages sont ainsi.

Art. 6. — Le viaduc est en courbes de rayons différents, ou en raccordement parabolique.

On adoptera pour les tympans, tout le long du viaduc, le même fruit, celui qui correspond au plus petit rayon.

CHAPITRE III

POSITION DES GARDE-CORPS

Art. 1. — Tracé des garde-corps.

Quel que soit le tracé des tympans (polygonaux ou courbes), les garde-corps seront toujours posés verticaux ; sauf dans le raccordement parabolique côté concave, ils seront parallèles à l'axe du tracé.

Art. 2. — Surécartement du côté concave.

En alignement droit, il y a 0^m655 entre le gabarit et la face intérieure du garde-corps (f_{15}).

Z | Gabarit | 0.655 | 1.60 | 1.50 | m | 0.755 | θ | Axe du tracé | h | 10 | 1.51 | Z_1 | f_{15}

Sur une voie en dévers D, le gabarit s'incline du côté concave de $\text{tang}\,\theta = \frac{D}{1^m51}$ ou, à très peu près $= 2/3$ D.

L'espace libre au niveau du sommet du garde-corps, à h au-dessus du rail bas est réduit de : $m = \frac{2hD}{3}$

Les garde-corps ont, au plus, 1^m de hauteur : le dessus de la plinthe est à 0^m10 en contrebas du rail voisin : $h = 0^m90$

D'où : $m = \frac{2 \times 0^m90 \times D}{3} = \frac{3\,D}{5}$

Le garde-corps sera donc écarté du côté concave de $3/5$ D ou, comme $D \leqslant 0^m16$, au plus de 0^m096.

Art. 3. — Parties en courbes de rayons différents ou en raccordement parabolique.

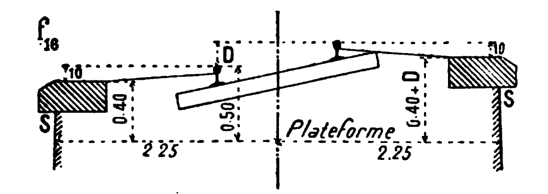
En tous points, la distance du garde-corps à l'axe de la voie sera : $2^m255 + \frac{3}{5}D$.

En alignement comme en courbe, la distance du garde-corps à la face verticale vue de la plinthe est constante.

PLINTHES

Art. 1. — Niveau. (f_{16}).

La plinthe du côté concave sera, comme en alignement, à 0^m10 en contre-bas du rail voisin, soit à 0^m40 au-dessus de la plate-forme ; la plinthe du côté convexe sera à 0^m40+D au-dessus de la plate-forme.

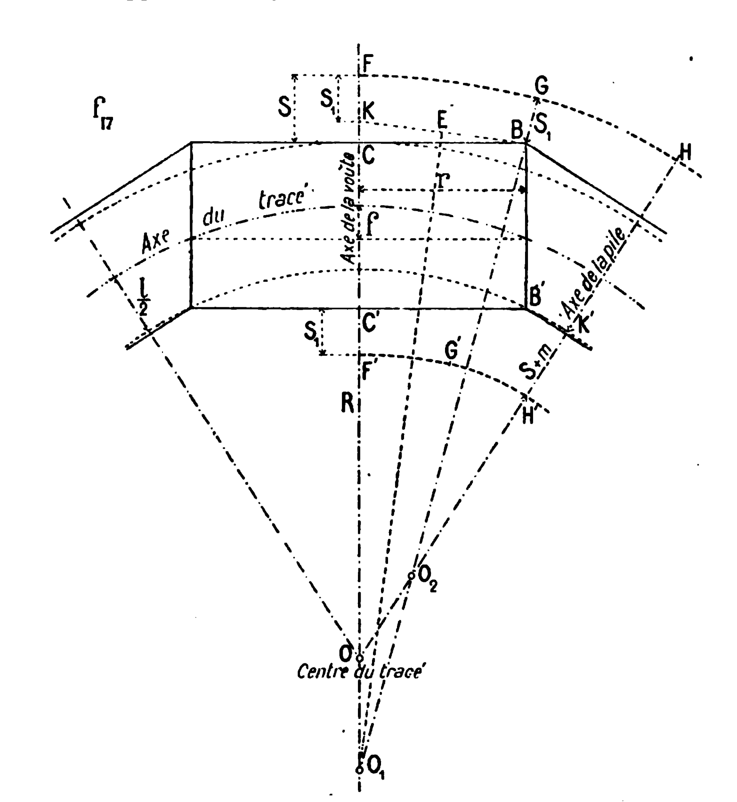


Art. 2. — Tracé en plan.

A. — *Règle commune aux deux têtes.* — Les deux plinthes seront posées en courbe, sans brisures.

B. — *Côté concave.* — Pour suivre le garde-corps, la plinthe sera déplacée vers le centre de la courbe et son porte-à-faux augmenté de $\frac{3}{5}D$ (p. 94). On augmentera sa queue pour qu'elle reste stable, mais non la distance du tympan à l'axe.

Supposons les tympans plans sur chaque arche et sur chaque pile (tympans à facettes p. 86)



Soient (f_{17}) :

S la saillie en alignement droit, CF' ;

S_1 la saillie minima à admettre, BG (0^m20) ;

m la surlargeur due au dévers, $\frac{3D}{5}$;

$f=\frac{r^2}{2R}$ la flèche du tracé sur la portée $2r$.

Le rayon de la plinthe sera :

$R-\frac{l}{2}-S-m$, si $S+m \geqslant f+S_1$ (ou $f \leqslant S-S_1+m$).

Si $f > S-S_1+m$,

on prend $C'F'=S_1$

$K'H'=S+m$.

On construit 2 arcs de cercle F'G', G'H' tangents entre eux, l'un passant par F' et ayant son centre sur OK, l'autre passant par H' et ayant son centre sur OH.

C. — *Côté convexe.* — Le rayon de la plinthe sera $R+\frac{l}{2}+S$, si $S \geqslant f+S_1$ ou $f \leqslant S-S_1$.

Si $f > S-S_1$, on prend $CK=S-S_1$; au milieu de BK, on élève la perpendiculaire EO_1.

De O_1 comme centre, avec le rayon O_1K+S_1, on décrit l'axe FG.

De O_2 (rencontre de O_1G avec l'axe de la pile) comme centre, on décrit l'arc GH tangent en G à GF.

TITRE III

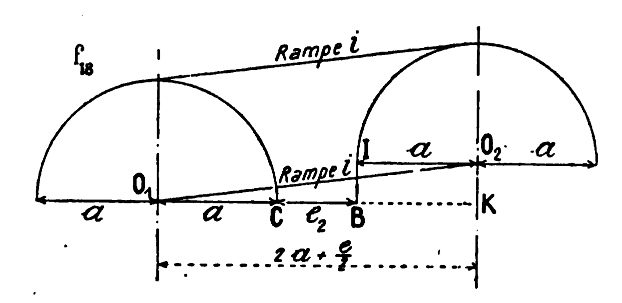
DISPOSITIONS SPÉCIALES AUX VIADUCS EN RAMPE

§ 1. — *INTRADOS*

Art. 1. — *1er système.* **Chaque voûte est décrite avec un rayon unique, comme en palier : les naissances, de part et d'autre d'une pile, sont à des niveaux différents (f_{18}).**

Les centres sont sur une parallèle aux rails en rampe i.

Au-dessus de l'horizontale BC de la naissance C de la voûte la plus basse, on prend un élément droit : $IB = O_2K = (2a + e_2)\, i$.

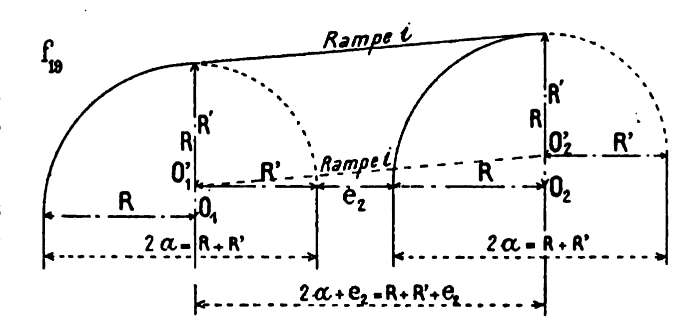


Ce petit élément ne se voit pas, si on ne met pas de cordon aux naissances, — et, pour l'aspect, il convient précisément de n'en point mettre.

A l'origine des chemins de fer, c'était le seul système appliqué, — c'est toujours le meilleur, — sauf sous très forte rampe.

J'admets, — un peu arbitrairement, — qu'on en limite l'application à 30mm.

Art. 2. — *2e système.* **Les deux moitiés d'une voûte sont décrites avec un rayon différent : les naissances, de part et d'autre d'une pile, sont au même niveau (f_{19}).** [8]



$$\begin{cases} R + R' = 2a \\ R - R' = (2a + e_2)\, i \end{cases}$$

$$\begin{cases} R = a + i\,(a + \frac{e_2}{2}) \\ R' = a - i\,(a + \frac{e_2}{2}) \end{cases}$$ [9]

Le sommet de la voûte n'est pas au milieu, — les deux 1/2 voûtes et leurs cintres ne sont pas symétriques, — on ne peut pas retourner les fermes des cintres.

8. — V, p. 81.

9. — Exemple : Viaduc de la Crueize (Ligne de Marvejols à Neussargues) :

$2a = 25^m$ $e_2 = 5^m20$ $i = 0^m0275$ $(a + \frac{e_2}{2})\, i = 0^m415$

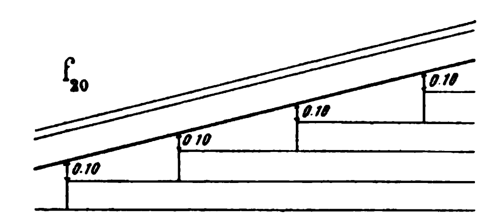
$R = 12^m915$ $R' = 12^m085$ $R - R' = 0^m830$.

Il y a donc un peu plus de sujétion dans la taille, l'assemblage et le « remploi » des cintres.

Il a été et est encore fort employé.[10, 11]

§ 2. — *TYMPANS ET CULÉES EN MOELLONS ASSISÉS*

Dans les viaducs en rampe, les assises des tympans, si elles sont horizontales, rencontrent le dessous de la plinthe sous un angle très aigu.

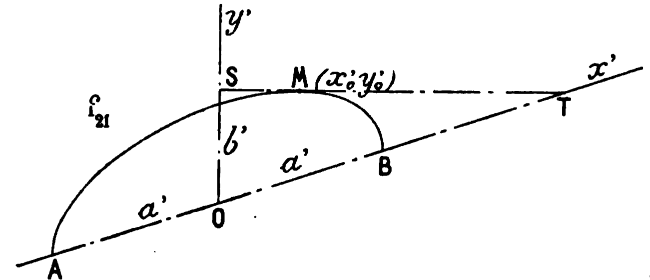


Souvent, on s'est borné à recouper les becs de flûte par les moellons de l'assise inférieure (f_{20}).

Mais il vaut mieux, incliner progressivement les assises à partir des naissances, de telle sorte que l'assise sous la plinthe ait la même pente[12].

10. — Grands viaducs des lignes de Limoges à Brive par Pompadour, — de Séverac à Neussargues....

11. — Si la rampe est très forte (chemin de fer à crémaillère, funiculaire), on peut prendre pour l'intrados une ellipse ayant comme diamètres conjugués la ligne des naissances et une verticale (f_{21}) (Tome V, p. 82); son équation est:



$$\frac{x'^2}{a'^2} + \frac{y'^2}{b'^2} = 1$$

MT, tang en M (x_0' y_0') $\begin{cases} OT = \dfrac{a'^2}{x_0'} \\ OS = \dfrac{b'^2}{y_0'} \end{cases}$

12. — Viaduc de Pompadour (Brive-Limoges) 1873-75.

TITRE IV

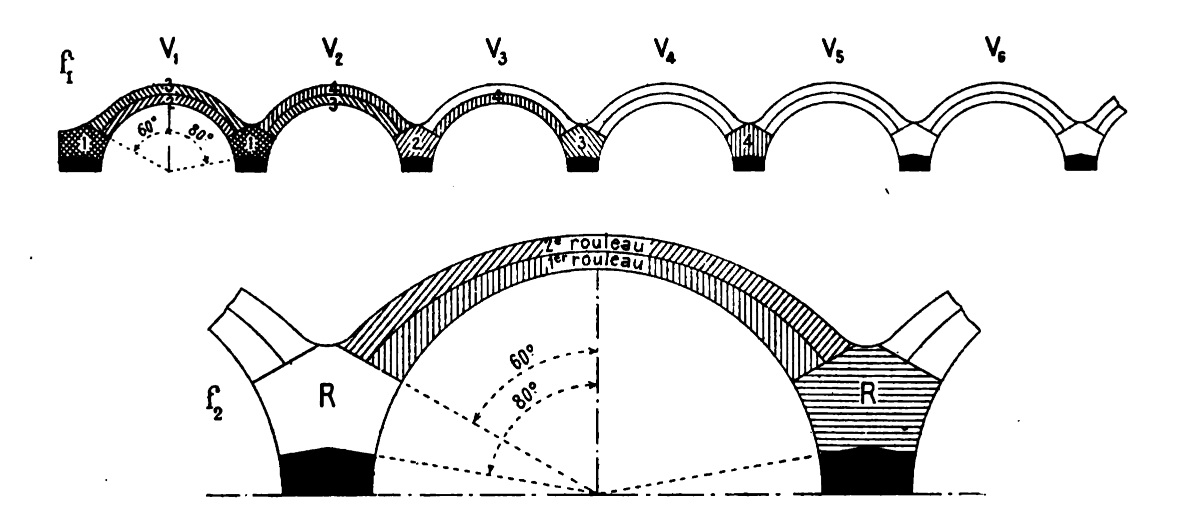
VIADUC A UN GRAND NOMBRE D'ARCHES
NOMBRE DE CINTRES[1]
EXÉCUTION DES VOÛTES « EN CASCADE »

Pour tracer ces quelques schémas d'exécution, on a dû faire force hypothèses : ce ne sont que de simples indications.

Art. 1. — Avec 5 cintres.

Avant de commencer la voûte V_1, on « lève » les cintres de V_1, V_2, V_3, (f_1), — puis, à temps, ceux de V_4 et V_5.

J'admets qu'il faille le même temps pour exécuter : la retombée R (f_2) entre 60° et 80°, le 1er rouleau, le 2e.



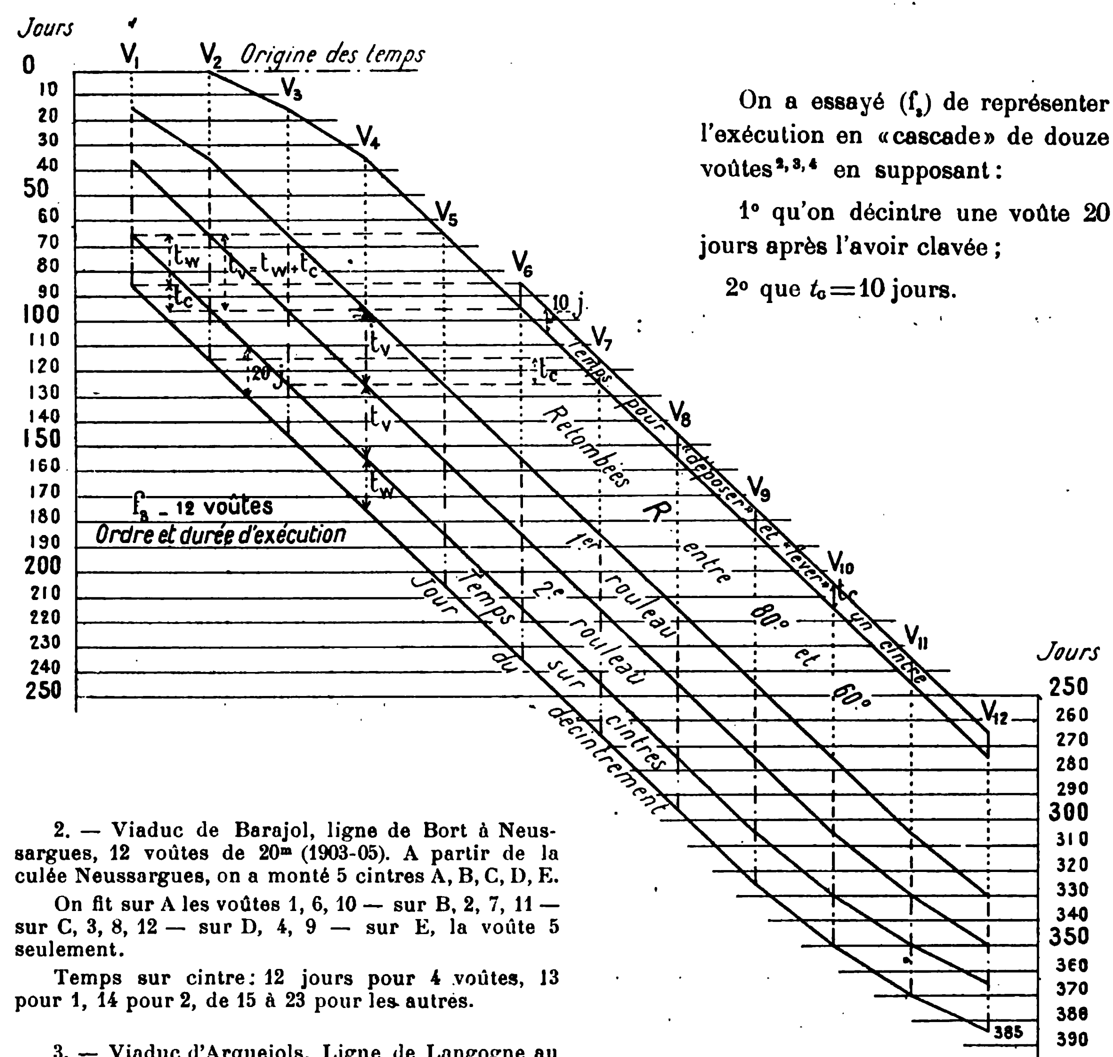
Il y a trois équipes de maçons, M_1, M_2, M_3. Dans le même temps, M_3 fait le 2e rouleau de la voûte n (par ex. V_2), M_2 le 1er de la voûte $n+1$ (V_3), M_1 la retombée commune aux deux voûtes $n+2$, $n+3$ (V_4, V_5).

Le jour du décintrement de la voûte n (par ex. V_2), le 2e rouleau de la voûte $n+1$ (V_3) et le 1er de $n+2$ (V_4) sont en cours : la retombée de V_{n+2} et V_{n+3} (V_4, V_5) est achevée, celle de V_{n+3}, V_{n+4} (V_5, V_6) en cours.

Soit t_c le temps nécessaire pour « déposer » et « lever » un cintre.

t_c après le décintrement de la voûte n (V_2), son cintre est prêt pour V_{n+5} (V_7) : le 2e rouleau de V_{n+1} (V_3) et le 1er de V_{n+2} (V_4) sont clavés : les retombées de V_{n+2}, V_{n+3} (V_4, V_5) et V_{n+3}, V_{n+4} (V_5, V_6) achevées.

1. — V. p. 156, 157.



On a essayé (f_3) de représenter l'exécution en «cascade» de douze voûtes[2,3,4] en supposant :

1° qu'on décintre une voûte 20 jours après l'avoir clavée ;

2° que $t_c = 10$ jours.

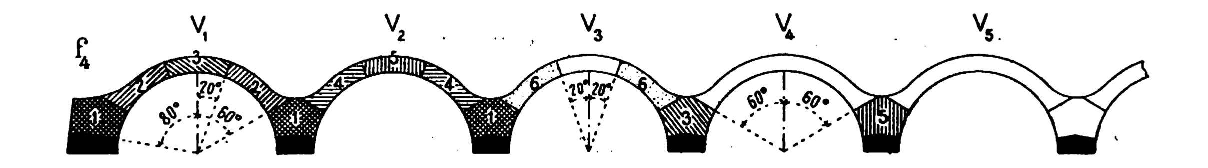
2. — Viaduc de Barajol, ligne de Bort à Neussargues, 12 voûtes de 20m (1903-05). A partir de la culée Neussargues, on a monté 5 cintres A, B, C, D, E.

On fit sur A les voûtes 1, 6, 10 — sur B, 2, 7, 11 — sur C, 3, 8, 12 — sur D, 4, 9 — sur E, la voûte 5 seulement.

Temps sur cintre : 12 jours pour 4 voûtes, 13 pour 1, 14 pour 2, de 15 à 23 pour les autres.

3. — Viaduc d'Arquejols, Ligne de Langogne au Puy, 11 voûtes de 15m (1906-07).

4. — Au viaduc de Mussy (Paray-le-Monial à Givors — 1892-95), les 18 voûtes de 25m ont été faites sur 5 cintres, mais à pleine épaisseur (f_4).



Quand on décintrait une voûte V_n (V_1), V_{n+1} (V_2) était clavée — les maçonneries étaient élevées :

pour V_{n+2} (V_3), à 20° de la clef, de chaque côté ;

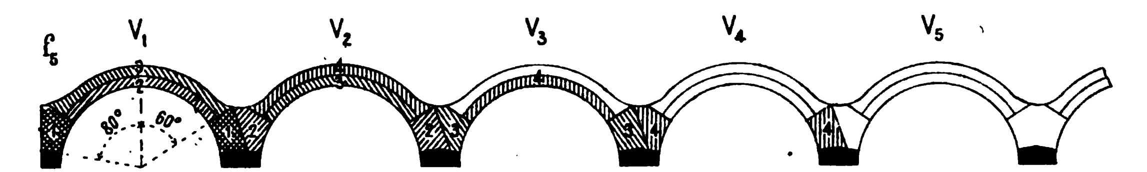
pour V_{n+3} (V_4), à 60° de la clef, de chaque côté ;

pour V_{n+4} (V_5), à 60° de la clef, mais à gauche seulement.

Art. 2. — Avec 4 cintres.

On est moins à l'aise. Il faut accepter quelque inconvénient.
On peut choisir deux ordres d'exécution :

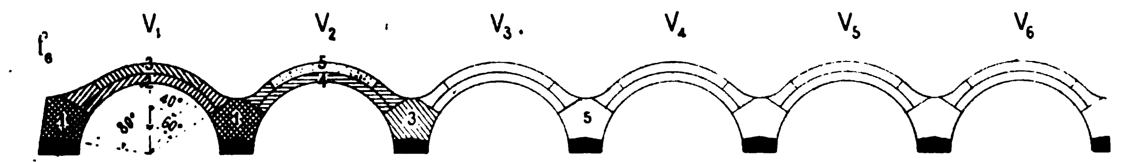
A. — On accepte de faire en deux fois le massif de retombée commun à deux voûtes (f_5).[5]



L'ordre d'exécution est le suivant :

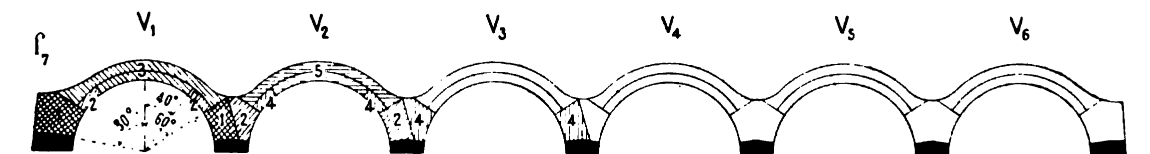
Voûte n°	Etat d'avancement simultané de 4 voûtes se suivant :		
n	1er rouleau clavé	2e rouleau clavé	décintrée
$n+1$	Retombées montées à 60° de la clef	1er rouleau clavé	2e rouleau clavé
$n+2$	»	Retombées montées à 60° de la clef	1er rouleau clavé
$n+3$	»	»	Retombées montées à 60° de la clef.

B. — Ou bien on accepte de claver une voûte n avant d'avoir construit le 1er rouleau de la voûte $n+1$ (f_6)[6].



Art. 3. — Avec 3 cintres.

Il faut accepter à la fois ces deux inconvénients : de faire en deux parties la retombée commune à deux voûtes, de claver une voûte n avant d'avoir construit le 1er rouleau de $n+1$ (f_7)[7].



Art. 4. — Avec 6 cintres.

On emploie six cintres,[8] et plus,[9] quand on veut aller vite.

5. — Viaduc de la Gascarie — Ligne de Carmaux à Rodez, 12 voûtes de 20m (1894-97) ;
Viaduc du Plô — Ligne d'Espalion à Bertholène, 7 voûtes de 17m (1903-04) ;
Viaduc de l'Oued Beja (Tunisie), 4 cintres pour 12 voûtes de 21m (1908-10).

6. — Viaduc de Morez — Ligne de Morez à Saint-Claude, 9 voûtes de 20m (1909-12).

7. — Viaduc de la Bargeasse — Ligne de Langogne au Puy, 6 voûtes de 10m (1906).

8. — Viaduc de Saint-Florent — Ligne d'Issoudun à Saint-Florent, 14 voûtes de 30m (1889-92) ;
Viaduc de l'Auzon — Ligne d'Argenton à La Châtre, 20 voûtes de 20m (1896-1900).

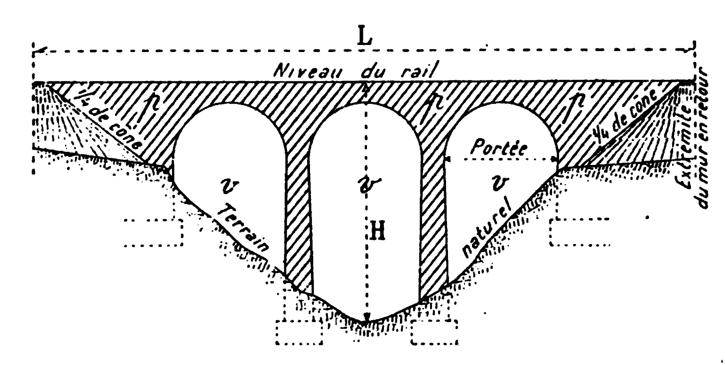
9. — Viaduc de la Bassera — Ligne de Nice à Coni, 7 voûtes de 12m, 7 cintres (1913-14).

TITRE V

CUBES ET DÉPENSES

CHAPITRE I

UNITÉS ADOPTÉES



Soient :

S_e — la surface vue d'élévation entre le rail, les 1/4 de cône et le terrain [1, 2] ;

p — la surface du plein en élévation ;

v — celle du vide,

$$p+v=S_e\,;$$

Q — le cube de maçonnerie à mortier du viaduc ;

D — sa dépense.

$Q : S_e$ — est le cube par mq d'élévation (vides et pleins ensemble) ;

$D : S_e$ [3]— est la dépense par mq d'élévation.

1. — Pour une première approximation grossière d'avant-projet, on peut admettre que S_e est 0,6 L H (c'est-à-dire plus grande que le triangle 1/2 L H, plus petite que la parabole $\frac{2}{3}$ L H).

2. — Pour les ouvrages étudiés aux Tomes I à IV, — en général ouvrages bas, sous route ou sous rail, c'est-à-dire de largeurs entre parapets très variables, — on a rapporté les quantités et dépenses :
1° à la surface offerte à la circulation S_p = L × (Largeur entre parapets), — surface utile ;
2° au volume W = S_e × (Largeur entre parapets), — volume « utile ». (Avertissement en tête des Tomes I à IV).
Pour les viaducs sous chemin de fer, ouvrages hauts, de largeur entre parapets à peu près fixe (4^m50 pour une voie, 8^m pour deux voies), il est plus pratique de rapporter à S_e les quantités et dépenses.

3. — $D : S_e$ varie beaucoup suivant les lieux, les dates, la difficulté des fondations.
On a proposé pour $D : S_e$:
Viaducs à une voie : 60^f + 0,8 H ;
Viaducs à deux voies : 80^f + H.
Mais il y a de très grands écarts par rapport à ces moyennes.

CUBES ET DÉPENSES PAR UNITÉ

§ 1. — *VIADUCS A DEUX VOIES*

TABLEAU SYNOPTIQUE

Ligne Date	Viaduc de :	Hauteur maxima H	Longueur L	Arches Nombre	Arches Portée	En élévation — Rapport du vide v à la surface totale $\frac{v}{S_e}$	En élévation — Rapport du vide v au plein $\frac{v}{p}$	En élévation — Par mètre carré — Cube de maçonn $\frac{Q}{S_e}$	En élévation — Par mètre carré — Dépense $\frac{D}{S_e}$	Prix moyen du m. c. de maçonn $\frac{D}{Q}$
		m	m		m			mc	f	f
Nantes à Brest 1859 à 1866	l'Aulne	54.00	357.00	12	22.00	0.68	2.13	3.46	154.00	44.00
	Pont-de-Buis	41.60	222.00	9	18.00	0.64	1.90	3.67	154.00	42.00
	Daoulas	38.10	357.00	15	18.00	0.57	2.04	3.51	135.00	38.00
	Quimperlé	31.35	156.60	7	15.00	0.62	1.64	3.46	134.00	39.00
	Auray	29.00	206.00	10	15.00	0.64	1.74	3.88	152.00	39.00
	Hennebont	27.37	222.00	5 6	22.00 10.00	0.64	1.80	3.63	197.00	54.00
	Châteaulin	24.20	117.00	7	12.00	0.61	1.58	3.63	112.00	31.00
	Moyennes					0.63	1.70	3mc42	143f.20	41f.90
		m	m		m			mc	f	f
Marvejols à Neussargues 1879 à 1888	Crueize	63.30	218.78	6	25.00	0.68	2.15	3.78	176.70	46.70
	Sénouard	43.00	231.10	9	18.00	0.67	2.05	4.33	166.70	38.50
	Chanteperdrix	42.00	238.34	9	20.00	0.67	2.00	3.91	173.00	44.20
	Merdarie	22.90	86.76	2	20.00	0.53	1.14	5.84	224.90	38.50
	Lignon	19.90	129.58	10	10.00	0.61	1.54	3.22	136.20	42.30
	Maison-Rouge	15.30	77.74	4 1	8.00 15.00	0.54	1.17	5.45	213.00	39.20
	Chapchiniès	13.17	51.25	4	8.00	0.58	1.38	5.02	170.80	34.10
	Moyennes					0.66	1.93	4mc09	173f.60	42f.40
		m	m		m			mc	f	f
Cahors à Brive 1881 à 1889	Boulet	37.00	476.00	26	15.00	0.71	2.50	3.52	142.00	40.00
	Souillac	32.47	571.13	30	15.00	0.71	2.50	3.48	129.00	37.10
	Sorbier	28.30	113.72	9	10.00	0.70	2.38	2.80	94.00	33.60
	Lamothe	25.90	313.95	15	15.00	0.63	1.70	4.67	141.00	30.20
	Planche-Torte	23.00	184.00	15	10.00	0.70	2.33	3.71	127.00	34.20
	Lignyroux	21.75	101.60	8	10.00	0.67	2.00	4.22	137.00	32.50
	Marjaudes	21.70	227.60	14	10.00	0.74	2.80	2.94	109.00	37.10
	Présignac	21.70	150.00	12	10.00	0.66	1.93	3.50	126.00	35.90
	Calamane	21.30	308.00	25	10.00	0.72	2.53	3.95	112.00	28.20
	Saint-Denis	20.00	81.22	7	8.00	0.68	2.08	7.46	196.00	26.30
	Lamouroux	19.50	118.00	9	10.00	0.67	2.00	6.01	175.00	29.00
	Moyennes					0.70	2.29	3mc83	132f.50	34f.60
		m	m		m			mc	f	f
Limoges à Brive par Uzerche 1886 à 1892	Saint-Germain-les-Belles	48.38	300.00	14	17.00	0.60	1.53	4.30	109.70	26.50
	Vigen	44.60	210.00	10	16.00	0.66	1.97	3.92	114.70	29.30
	Pierre-Buffière	42.00	211.00	11	15.00	0.67	2.07	3.65	121.80	33.30
	la Pélisserie	32.60	114.00	7	12.00	0.65	1.87	3.34	105.80	31.60
	Limoges	31.50	423.40	23	15.00	0.69	2.22	2.98	100.10	33.70
	Clan	25.14	168.80	13	10.00	0.65	1.87	2.91	102.60	35.20
	la Rozelle	16.70	73.20	5	10.00	0.58	1.39	4.29	126.30	29.40
	Moyennes					0.66	1.88	3mc61	110f.30	30f.50

TABLEAU SYNOPTIQUE

Ligne Date	Viaduc de :	Hauteur maxima H	Longueur L	Arches Nombre	Arches Portée	En élévation — Rapport du vide v à la surface totale $\frac{v}{S_e}$	En élévation — Rapport du vide v au plein $\frac{v}{p}$	En élévation — Par mètre carré Cube de maçon^{n} $\frac{Q}{S_e}$	En élévation — Par mètre carré Dépense $\frac{D}{S_e}$	Prix moyen du m. c. de maçon^{n} $\frac{D}{Q}$
		m	m		m			mc	f	f
Argenteuil à Mantes 1888 à 1892	Sur le grand ravin de La Frette.	22.40	96.00	7	10.00	0.66	1.91	3. 68	132.10	35.90
	Maurecourt	15.31	52.57	3	11.00	0.52	1.06	4. 43	134.50	30.40
	la Montcient	13.39	48.60	3	11.50	0.56	1.25	6. 48	290.10	46.10
	Sur le petit ravin de La Frette.	11.77	33.30	3	7.00	0.51	1.05	3. 87	112.60	31.20
	Bas-Vals	11.43	85.80	3	20.00	0.47	0.88	4. 65	226.30	48.70
	Triel	8.63	72.15	6 1 1	5.10 8.00 9.00	0.50	1.01	6. 57	216.70	33.00
	Moyennes					0.56	1.28	4^{mc}63	178^{f}.30	38^{f}.50
		m	m		m			mc	f	f
Bourges à Cosne 1889 à 1893	Saint-Satur	27.80	428.65	26	13.00	0.66	1.98	4. 38	117.50	26.90
	Ménétréol	19.30	190.20	15	10.00	0.65	1.82	4. 05	119.50	29.50
	Thauvenay	15.26	45.83	3	10.00	0.61	1.56	10. 30	241.70	23.50
	Moultonneaux	15.54	38.48	3	8.50	0.62	1.60	7. 00	152.20	21.70
	Moyennes					0.66	1.91	4^{mc}57	123^{f}.10	26^{f}.90
		m	m		m			mc	f	f
Issoudun à Saint-Florent 1889 à 1893	Saint-Florent	21.60	524.46	14	30.00	0.73	2.75	3. 05	121.00	30.70
		m	m		m			mc	f	f
Paray-le-Monial à Lamure 1892 à 1899	Mussy	59.76	561.00	18	25.00	0.68	2.15	4. 03	128.60	31.90
	Villon	31.50	155.00	8	15.00	0.64	1.81	3. 20	77.90	24.30
	la Boucle	29.00	130.00	4 2	12.00 20.00	0.53	1.14	4. 13	105.40	25.50
	Chez Aulas	26.65	128.00	8	12.00	0.63	1.73	3. 37	94.00	27.90
	la Foraize	25.00	119.00	6	15.00	0.57	1.33	3. 51	95.40	27.20
	Collier	24.60	121.00	7	12.00	0.62	1.61	3. 58	100.00	28.00
	Montveneur	24.50	127.00	6	15.00	0.59	1.43	3. 55	88.10	24.80
	la Grange-Neuve	20.00	109.00	5	15.00	0.58	1.39	3. 99	108.60	27.30
	Moyennes					0.65	1.85	3^{mc}85	114^{f}.60	27^{f}.80

TABLEAU SYNOPTIQUE

Ligne Date	Viaduc de :	Hauteur maxima H	Longueur L	Arches Nombre	Arches Portée	En élévation — Rapport du vide v à la surface totale $\frac{v}{S_e}$	Rapport du vide v au plein $\frac{v}{p}$	Par mètre carré — Cube de maçon^{rie} $\frac{Q}{S_e}$	Par mètre carré — Dépense $\frac{D}{S_e}$	Prix moyen du m. c. de maçon^{rie} $\frac{D}{Q}$
Miramas à L'Estaque 1910 à 1914	l'Etable	38^{m}89	90^{m}74	1 2	25^{m}00 15.00	0.44	0.79	3^{mc}71	150^{f}27	40^{f}53
	Aragnols	37.54	112.00	3	20.00	0.57	1.32	3.72	155.85	41.88
	Jonquier	37.00	137.60	1 4	30.00 15.00	0.61	1.53	3.28	161.77	49.25
	la Vesse	35.38	168.00	6	20.00	0.64	1.79	2.48	192.50	79.73
	Méjean	34.50	122.40	5	15.00	0.61	1.55	3.30	142.43	43.12
	Riaux	33.00	178.90	8	15.00	0.48	0.92	3.83	151.74	39.61
	Mauvallon	31.40	154.50	6	15.00	0.54	1.20	3.07	136.45	44.42
	Loubatons	30.83	182.30	7	15.00	0.51	1.05	3.09	131.58	42.58
	la Baume de Lume	27.90	61.10	3	13.00	0.54	1.19	2.33	118.04	50.73
	l'Aigle	27.60	107.50	4	15.00	0.50	1.01	4.28	224.66	52.52
	la Corbière	27.18	226.62	6 7	6.50 20.00	0.57	1.30	3.21	128.62	40.13
	Verdon	26.40	115.00	6	15.00	0.64	1.76	2.84	114.44	42.62
	Grand Vallat	20.30	151.00	8	15.00	0.62	1.60	3.52	205.53	58.41
	la Réraille	19.60	99.00	5	15.00	0.59	1.43	3.25	162.99	50.13
	Vauclair	11.50	64.50	5	8.00	0.38	0.60	2.75	137.84	50.17
	Piche	11.00	53.00	5	8.00	0.23	0.29	4.46	243.00	54.40
	Moyennes	......	......	......	......	0.56	1.27	3^{mc}24	155^{f}40	48^{f}02
Moyennes générales sur 67 viaducs ayant ensemble 267.100^{mq} de surface d'élévation totale, 983.396^{mc} de maçonnerie à mortier, ayant coûté 36.274.984 fr.						0.65	1.82	3^{mc}68	135^{f}81	36^{f}89

TABLEAU SYNOPTIQUE

Ligne Date	Viaduc de :	Hauteur maxima H	Longueur L	Arches Nombre	Arches Portée	En élévation — Rapport du vide v à la surface totale $\frac{v}{S_e}$	En élévation — Rapport du vide v au plein $\frac{v}{p}$	En élévation — Par mètre carré — Cube de maçonn. $\frac{Q}{S_e}$	En élévation — Par mètre carré — Dépense $\frac{D}{S_e}$	Prix moyen du m. c. de maçonn. $\frac{D}{Q}$
Limoges à Brive 1873 à 1875	Pompadour	55.00 m	285.00 m	8	25.00 m	0.65	2.08	2. 25 mc	146.00 f	65.00 f
	la Sagne	36.40	157.50	5	20.00	0.65	1.88	1. 70	90.00	59.00
	la Boucheuse	28.60	178.00	7	20.00	0.67	2.04	2. 02	92.00	45.00
	la Donne	26.00	130.00	5	20.00	0.63	1.67	2. 20	101.00	46.00
	la Loue	24.70	135.80	5	18.00	0.63	1.69	2. 30	99.00	43.00
	Sarget	24.45	143.00	5	20.00	0.61	1.57	2. 81	136.00	48.00
	Vignols	21.00	252.00	10	20.00	0.58	1.39	2. 36	131.00	55.00
	l'Isle	16.60	51.00	3	12.00	0.55	1.22	2. 57	111.00	43.00
	Combes	13.50	54.60	1 2	16.00 10.00	0.56	1.25	1. 65	124.00	76.00
	la Pouge	13.30	84.00	3	20.00	0.51	1.02	2. 16	105.00	49.00
	la Meyze	12.00	75.20	3	18.00	0·51	1.04	3. 31	131.00	40.00
	Haute-Vézère	12.00	42.00	3	10.00	0.52	1.08	3. 25	145.00	44.00
	Monteil	12.00	83.00	7	8.00	0.52	1.09	2. 09	132.00	63.00
	la Croix	10.70	63.90	5	8.00	0.48	0.92	2. 06	129.00	63.00
	Boulou	10.00	37.60	1 2	9.00 8.00	0.50	1.00	3. 27	136.00	42.00
	Moyennes	......	....	......	......	0.62	1.66	2mc26	120f.80	53f.40
La Flèche à La Suze et à Sablé 1875 à 1877	Sablé	21.50 m	285.00 m	11	20.00 m	0.61	1.59	2. 18 mc	104.00 f	47.80 f
Marvejols à Neussargues 1879 à 1888	Blaud	21.60 m	114.00 m	8	10.00 m	0.65	1.89	2. 60 mc	87.50 f	33.70 f
	Rimeize	18.70	129.35	10	10.00	0.64	1.80	2. 92	93.80	32.10
	Varillette	17.00	134.30	10	10.00	0.64	1.76	2. 33	97.80	41.90
	Massalès	16.50	90.20	5	12.00	0.63	1.68	2. 95	89.00	30.20
	Saillant	16.50	51.30	3	10.00	0.57	1.35	2. 83	114.30	40.40
	la Combe	13.80	47.20	3	10.00	0.60	1.53	3. 35	126.20	37.70
	Triboulin	10.80	56.31	5	10.00	0.56	1.31	3. 26	168.60	51.70
	Malagazanne	6.90	34.20	2 1	4.00 12.00	0.45	0.89	3. 64	167.70	46.10
	Moyennes	......	....	......	......	0.63	1.67	2mc79	101f.90	36f.50
Saint-Denis au Buisson 1880 à 1884	Bramefond	44.14 m	321.65 m	14	17.00 m	0.68	2.14	2. 29 mc	75.30 f	32.80 f
	Courtils	35.00	141.80	7	15.00	0.66	1.94	2. 60	104.80	40.20
	Moyennes	......	....	......	......	0.68	2.10	2mc36	81f.60	34f.60

TABLEAU SYNOPTIQUE

Ligne Date	Viaduc de :	Hauteur maxima **H**	Longueur **L**	Arches Nombre	Arches Portée	En élévation — Rapport du vide v — à la surface totale $\frac{v}{S_e}$	En élévation — Rapport du vide v — au plein $\frac{v}{p}$	En élévation — Par mètre carré — Cube de maçonn. $\frac{Q}{S_e}$	En élévation — Par mètre carré — Dépense $\frac{D}{S_e}$	Prix moyen du m. c. de maçonn. $\frac{D}{Q}$
Tournon au Blanc 1880 à 1885	l'Isle-Jourdain	m 38.60	m 304.00	12	m 20.00	0.71	2.41	mc 2.01	f 97.00	f 48.00
	Blanc	38.11	528.00	21	20.00	0.70	2.32	2.80	142.00	51.00
	la Villerie	24.26	113.60	5	15.00	0.64	1.75	2.63	106.00	40.50
	la Charente	24.00	140.00	6	16.00	0.64	1.77	2.66	103.00	38.80
	la Caronnière	18.28	92.00	7	10.00	0.68	2.13	2.28	101.00	44.20
	la Faye	15.90	55.00	5	8.00	0.64	1.82	3.64	141.00	38.80
	Tersac	14.60	41.60	3	10.00	0.61	1.56	3.10	167.00	53.70
	Chez-Dinette	14.50	74.20	7	8.00	0.66	1.95	4.63	163.00	35.30
	Bourbes	14.30	55.00	5	8.00	0.61	1.55	2.70	128.00	47.40
	Salleron	12.69	47.50	1 2	14.00 10.00	0.56	1.15	5.13	239.00	46.50
	Grand-Vicq	11.55	51.00	1 1 1	9.89 10.11 16.00	0.56	1.27	3.98	205.00	51.60
	Moyennes					0.69	2.17	2mc64	126f.00	47f.70
Aurillac à Saint-Denis 1883 à 1884	l'Authre	m 34.14	m 118.35	5	m 16.00	0.68	2.15	mc 2.07	f 85.00	f 41.00
	la Cère	24.89	123.35	7	12.00	0.67	2.02	1.83	92.00	50.00
	l'Auze	23.92	108.75	6	12.00	0.67	2.07	1.89	73.00	38.00
	Moyennes					0.68	2.08	1mc94	83f.80	43f.20
Carmaux à Rodez 1894 à 1897	la Gascarie	m 49.00	m 296.30	12	m 20.00	0.68	2.15	mc 2.04	f 61.90	f 30.40
Argenton à La Châtre 1897 à 1901	l'Auzon	m 42.70	m 499.00	20	m 20.00	0.70	2.30	mc 3.79	f 122.50	f 32.30
Guéret à La Châtre 1901 à 1905	la Creuse	m 19.50	m 202.10	16	m 10.00	0.68	2.08	mc 2.35	f 94.50	f 40.30
	la Glane	19.40	152.20	12	10.00	0.69	2.20	2.36	103.40	43.90
	la Petite Creuse	19.20	208.60	16	10.00	0.67	2.01	2.61	124.00	47.50
	Moyennes					0.68	2.08	2mc45	107f.70	44f.00

TABLEAU SYNOPTIQUE

Ligne Date	Viaduc de :	Hauteur maxima H	Longueur L	Arches Nombre	Arches Portée	En élévation — Rapport du vide r — à la surface totale $\frac{v}{S_e}$	En élévation — Rapport du vide r — au plein $\frac{r}{p}$	En élévation — Par mètre carré — Cube de maçonnerie $\frac{Q}{S_e}$	En élévation — Par mètre carré — Dépense $\frac{D}{S_e}$	Prix moyen du m. c. de maçonnerie $\frac{D}{Q}$
Espalion à Bertholène 1903 à 1904	Plò	42.20 m	158.60 m	7	17.00 m	0.69	2.18	2. 13 mc	85.60 f	40.20 f
	Labaume	36.00	114.00	6	14.00	0.68	2.10	1. 95	78.10	40.00
	Goudal	30.60	123.70	7	12.50	0.68	2.08	2. 11	79.10	37.40
	Conquettes	29.68	172.26	12	11.00	0.70	2.30	2. 08	73.70	35.50
	la Loubière	23.20	103.50	7	11.00	0.68	2.14	2. 07	83.80	40.40
	Moyennes					0.69	2.18	2mc08	79f.70	38f.30
Bort à Neussargues 1901 à 1907	Barajol	56.41 m	317.00 m	12	20.00 m	0.69	2.22	3. 17 mc	167.26 f	52.75 f
	Saint-Saturnin	36.30	205.70	10	15.00	0.70	2.36	3. 23	111.90	34.70
	Lugarde	25.90	153.21	12	10.00	0.68	2.11	3. 70	130.58	35.33
	Salsignac	24.30	189.41	14	10.00	0.62	1.65	1. 87	74.51	39.91
	Chassagny	22.24	97.54	6	12.00	0.60	1.47	3. 73	195.47	52.45
	Moyennes					0.68	2.08	3mc12	140f.90	45f.22
Langogne au Puy 1905 à 1908	Arquejols	44.90 m	209.00 m	6	10.00 m	0.67	2.03	2. 14 mc	74.84 f	35.02 f
	la Bargeasse	21.48	93.50	11	15.00	0.57	1.34	2. 96	87.26	29.43
	Moyennes					0.65	1.85	2mc31	77f.37	33f.55
Morez à Saint-Claude 1908 à 1910	Saillard	46.40 m	97.68 m	1 4	25.00 m 12.00	0.63	1.67	2. 19 mc	80.97 f	36.95 f
	Morez	40.68	238.05	9	20.00	0.68	2.12	2. 78	121.13	43.60
	Valfin	27.80	77.50	6	10.00	0.63	1.69	2. 97	125.40	42.22
	Crêt	15.75	34.90	5	5.00	0.51	1.03	3. 06	151.20	49.37
	Pain de Sucre	15.30	121.78	1 15	15.00 5.00	0.50	1.00	3. 01	132.66	44.13
	Puits	14.40	71.00	9	6.00	0.67	2.05	3. 06	128.20	41.96
	la Culée	12.12	22.20	3	5.00	0.58	1.36	3. 58	175.93	49.13
	Moyennes					0.64	1.77	2mc75	117f.56	42f.73
Moyennes générales sur 64 viaducs ayant ensemble 184.446mq de surface d'élévation totale, 481.402mc de maçonnerie à mortier, ayant coûté 20.577.900 fr.						0.66	1.98	2mc61	111f.57	42f.75

2e PARTIE

CALCULS ET ÉPURES

LIVRE I

COMMENT ON CALCULE UN CINTRE

LIVRE II

COMMENT ON CALCULE UNE VOÛTE

LIVRE I

COMMENT ON CALCULE UN CINTRE[1]

PONT ADOLPHE, A LUXEMBOURG[2]

CHAPITRE I

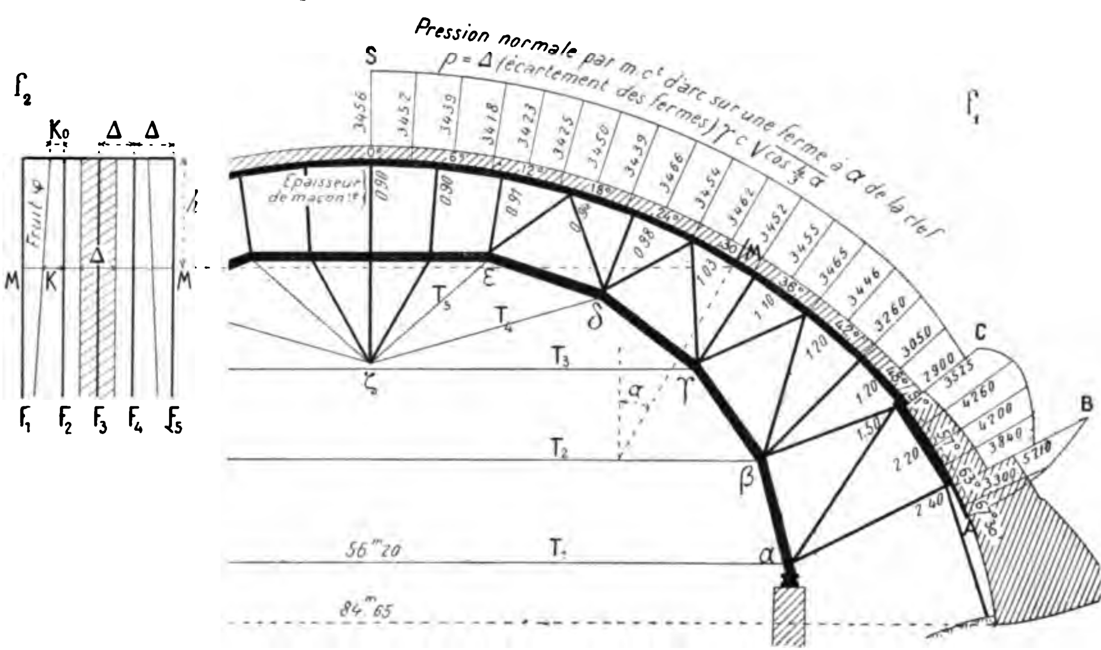
FERMES

§ 1. — *PRESSION NORMALE SUR LE CINTRE, A α° DE LA CLEF*

Par mètre carré, c'est :

$$p_\alpha = \gamma c \sqrt{\operatorname{Cos} \frac{4}{3} \alpha} \quad {}^{3,\,4}$$

γ densité de la maçonnerie $= 2.400^k$
c épaisseur admise en M.

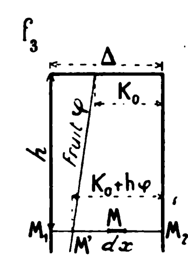


Soit Δ l'écartement des fermes (1^m60).

La charge sur 1^m de longueur de ferme en M, à α de la clef, est :

pour une ferme intermédiaire, telle que F_3 (f_1), $p_M = \Delta\, p_\alpha$

pour une ferme de rive F_1 : $p'_M = \frac{p_\alpha}{2\Delta} \left[k_0 \; ; \; h\varphi \right]^2$ [5]



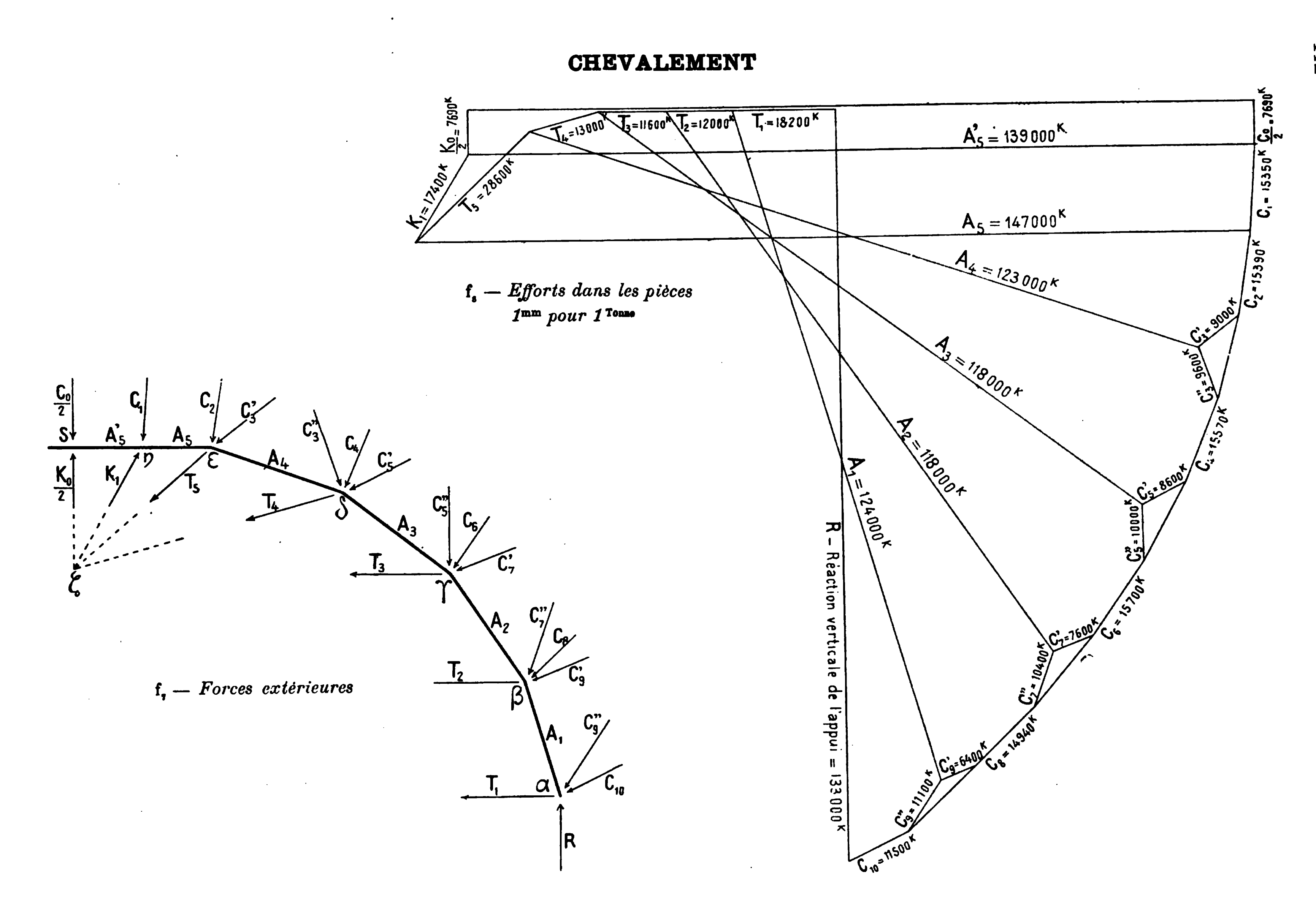
1. — V, p. 132 à 156. 2. — II, p. 70 à 74, pl. 4 et 5. 3. — V, p. 155.

4. — Voir, à la fin du Tome VI, les tables numériques de log $\sqrt{\operatorname{Cos} \frac{4}{3} \alpha}$, $\sqrt{\operatorname{Cos} \frac{4}{3} \alpha}$, pour α de 0° à 67°30'.

5. — La pression sur M (f_3) est $p_\alpha \, dx$, dont la composante en M_1 est $p_\alpha \, dx \frac{x}{\Delta}$.

Pour la largeur M' M_2, elle est : $\frac{p_\alpha}{\Delta} \Sigma_0^{M'} x \; dx = \frac{p_\alpha}{2\Delta} \left(k_0 + h_\varphi \right)^2$

CHEVALEMENT



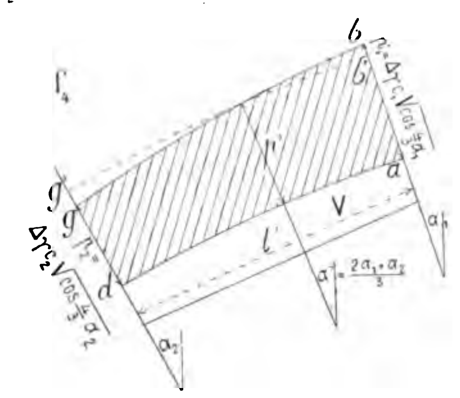
f₂ — *Efforts dans les pièces*
1mm pour 1 Tonne

f₁ — *Forces extérieures*

Voici, détaillé, le calcul d'une ferme intermédiaire :

§ 2. — *EFFORTS DANS LES PIÈCES*

Art. 1. — Vaux.



La pression totale sur le vau V (f_4) est représentée par l'aire *abgd*.

On l'a remplacée par l'aire *ab'g'd* de hauteur constante p' :

$$p' = \Delta\gamma c \sqrt{\cos\frac{4}{3}\alpha'}\,,$$

$$\text{avec}\quad \alpha' = \frac{2\alpha_1+\alpha_2}{3}\,.$$

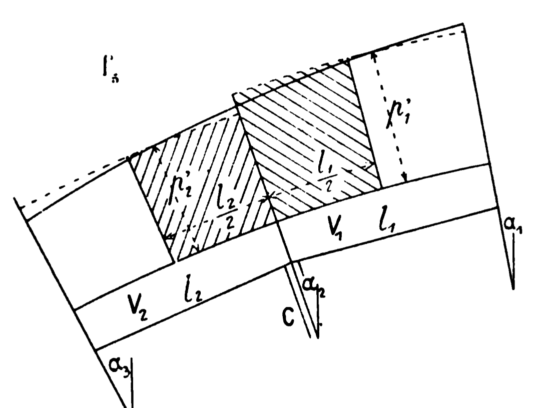
Art. 2. — Contrefiches.

A. — Suivant le rayon.

B. — Inclinées sur le rayon.

Une contrefiche C (f_5) reçoit :

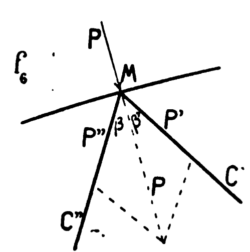
$$P = \frac{1}{2}\Delta\gamma c_1 l_1 \sqrt{\cos\frac{4}{3}\frac{2\alpha_1+\alpha_2}{3}}\,(\text{Vau } V_1) + \frac{1}{2}\Delta\gamma c_2 l_2 \sqrt{\cos\frac{4}{3}\frac{2\alpha_2+\alpha_3}{3}}\,(\text{Vau } V_2)$$



L'effort P en M (f_6) se divise en

$$P' \text{ (sur C')} = P\frac{\sin\beta}{\sin(\beta+\beta')}$$

$$P'' \text{ (sur C'')} = P\frac{\sin\beta'}{\sin(\beta+\beta')}$$



Art. 3. — Chevalement.

Les efforts intérieurs (compressions dans les arbalétriers, tensions dans les câbles) font équilibre aux forces extérieures (f_7) (réactions des deux appuis, compressions transmises par les contrefiches). C'est ce qu'exprime la fig. 8.

§ 3. — *SECTIONS DES PIÈCES*

Art. 1. — Vaux.

Bien qu'encastrés à leurs abouts, entre eux et avec les contrefiches par les couvre-joints en tôle, on les a calculés comme simplement posés.

	Longueur	Pression par m. c^t p'	Flèche f	Hauteur aux abouts b calculée	Hauteur aux abouts b adoptée
	m		m	m	
V_1	4.45	3450^k	0.05	0.48	
V_2	4.45	3440	0.05	0.48	
V_3	4.50	3425	0.06	0.47	
V_4	4.50	3450	0.06	0.47	m
V_5	4.55	3460	0.06	0.48	0.48
V_6	4.55	3470	0.06	0.48	
V_7	4.60	3490	0.06	0.49	
V_8	4.60	3400	0.06	0.48	
V_9	4.10	3100	0.06	0.40	
V_{10}	5.40	3970	0.14	0.54	0.56

$$\mathfrak{M}\left(\begin{matrix}\text{moment de flexion}\\ \text{maximum}\end{matrix}\right) = \frac{1}{8}p'\ (\S\,2,\ \text{art. } 1) \times l^2 =$$

$$\beta\left(\begin{matrix}\text{effort permis}\\ \text{en } K^g/\overline{0^m01^2}\end{matrix}\right) \times 10^4 \times \frac{a(b+f)^2}{6}$$

$$\beta = 80^k\ [6] \qquad a = 0^m23$$

6. — V, p. 156.

Aux ponts de Luxembourg et des Amidonniers[7], les vaux ont été peut-être un peu faibles. On les avait calculés seulement pour ne pas rompre. Il conviendra de s'imposer une flèche maxima[8] fonction de la portée du vau. On avait fait ainsi au pont du Castelet[9], au pont Antoinette[9].

Art 2. — Contrefiches.

Soit φ l'élancement $= \dfrac{l \text{ (longueur libre de la pièce)}}{b \text{ (plus petit côté de la section)}}$

On a admis comme pression moyenne permise par $\overline{0^m01}^2$:

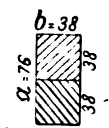
$$\beta_m = \frac{80}{1 + \left(\frac{\varphi}{24}\right)^2} \quad {}^{10,\ 11}$$

On a pris pour l la longueur totale de la contrefiche, bien qu'elle soit coupée par un ou deux cours de moises.

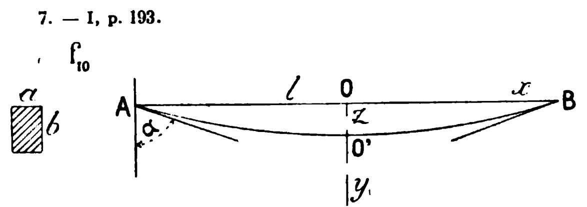
	Longueur l	Plus petite dimension b (en élévation)	Elancement $\varphi = \frac{l}{b}$	Compression moyenne permise par $\overline{0.01}^2$ $\beta_m = \frac{80}{1+\left(\frac{\varphi}{24}\right)^2}$	Effort total P	Section en $\overline{0.01}^2$ $\Omega = ab = \frac{P}{\beta_m}$	Epaisseur $a = \frac{\Omega}{b}$ calculée	adoptée
	m			k				
C_0	5.50	21 cm	26	36.80	15380 k	418 cmq	20 cm	
C_1	5.40	19	28	33.88	15350	453	24	
C_2	4.90	19	26	36.80	15390	418	22	
C_3'	6.30	19	33	27.68	9000	325	17	
C_3''	6.80	19	36	24.61	9600	390	21	
C_4	5.30	21	25	38.36	15570	406	19	23 cm
C_5'	6.80	19	36	24.61	8600	349	18	
C_5''	7.80	21	37	23.69	10000	422	20	
C_6	6.60	23	29	32.52	15700	483	21	
C_7'	7.80	19	41	20.42	7600	372	20	
C_7''	9.60	23	42	19.69	10400	528	23	
C_8	8.80	23	38	22.81	14940	655	28	
C_9'	9.20	19	48	16.00	6400	400	21	
C_9''	11.50	25	46	17.12	11100	648	25	25
C_{10}	11.00	25	44	18.34	11500	627	25	
K_0	6.70	21	32	28.80	15380	534	25	26
K_1	7.80	24	33	27.68	17400	630	26	

Art. 3. — Arbalétriers.

Equarrissage adopté :



7. — I, p. 193.



8. — Un vau de longueur l, de section supposée constante $a \times b$, prend, sous une charge p par mètre courant, une flèche :

$$s = \frac{5\,pl^4}{32\,E\,a\,b^3} \quad \text{E, coefficient d'élasticité} = 1{,}2 \times 10^9.$$

$$\frac{s}{l} = \frac{5p}{32\,Ea}\left(\frac{l}{b}\right)^3$$

9. — Annales des Ponts et Chaussées, octobre 1886 — *Construction des ponts du Castelet, de Lavaur et Antoinette*, M. Séjourné, p. 538, 539.

10. — V, p. 156.

11. — Voir plus loin les tables numériques de β_m pour φ de 0 à 50.

	Longueur l	Elancement $\varphi = \frac{l}{38}$	Compression moyenne permise par $\overline{0.01}^2$ $\beta_m = \frac{80}{\left(1+\frac{\varphi}{24}\right)^2}$	Effort total P	Section en $\overline{0.01}^2$ $\Omega = ab = \frac{P}{\beta_m}$	Hauteur $a = \frac{\Omega}{38}$ calculée	adoptée
A_1	7m30	19	49k18	124000k	2521cmq	66cm	76cm
A_2	7.65	20	47.21	118000	2499	66	
A_3	7.85	21	45.31	118000	2604	68	
A_4	7.90	21	45.31	123000	2715	71	
A_5	4.00	10	68.17	147000	2156	57	

	Tension T	Travail par $\overline{0,001}^2$ $\frac{T}{\Omega}$ [12]
T_1	18.200k	25k
T_2	12.000	16.5
T_3	11.600	16
T_4	13.000	17.8
T_5' T_5''	28.600	19.6

Art. 4. — Câbles.

Chaque câble a été fait de 61 fils de 3mm9.

Section utile :

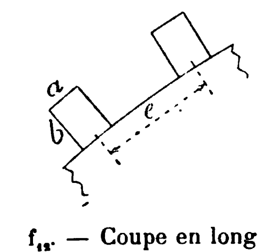
$$\Omega = 728^{mmq}7.$$

CHAPITRE II

COUCHIS

Bien que d'une seule pièce et cloués sur les vaux, on les a calculés comme coupés au droit de chaque ferme et simplement posés dessus.

f_{11}. — Coupe en travers



f_{12}. — Coupe en long

On a admis : $\frac{a}{b} = \frac{5}{7}$ [13] ; $a = 0^m10$, $b = 0^m14$.

La pression par mètre courant de couchis, à α de la clef, est :

$$p_\alpha \left(\text{pression par mq. de douelle}\right) \times e$$

$$\mathfrak{M}\left(\text{moment de flexion maximum}\right) = \frac{1}{8} p_\alpha e \Delta^2 = 10^4 \beta \left(\text{travail maximum permis en } K^g/\overline{0^m01}^2 = 80^k\right) \times \frac{1}{6} ab^2$$ [14]

Ici : $e = \dfrac{1306,66}{p_\alpha \Delta = p \left(\text{pression par mc}^t \text{ d'arc indiquée sur } f_1\right)}$

On trouve :

Entre 0° et 51° (sommiers), de 0m38 à 0m43 : on a adopté 0m38 ;
au-dessous, de 0m23 à 0m39 : on a adopté 0m25.

12. — V, p. 156. 13. — V, p. 134.

14. — e croît de la clef aux reins ; il est infini pour $p = 0$ (α=67°30') ; la dépense en couchis par mètre courant de ferme est proportionnelle à $\frac{ab}{e} = \frac{3 p_\alpha \Delta^2}{4 \beta \times 10^4 b}$: il y aurait donc théoriquement économie, pour une épaisseur donnée de platelage, à augmenter la hauteur et l'espacement des couchis.

LIVRE II

COMMENT ON CALCULE UNE VOÛTE

ARC ÉLASTIQUE INARTICULÉ

SUR APPUIS IMMOBILES

MÉTHODE CULMANN-RITTER

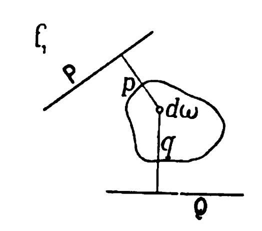
TITRE I

PRÉAMBULE

MOMENTS DU SECOND DEGRÉ D'UNE SURFACE Ω PAR RAPPORT :

A UNE DROITE P ($\Sigma p^2 d\omega$, moment d'inertie)

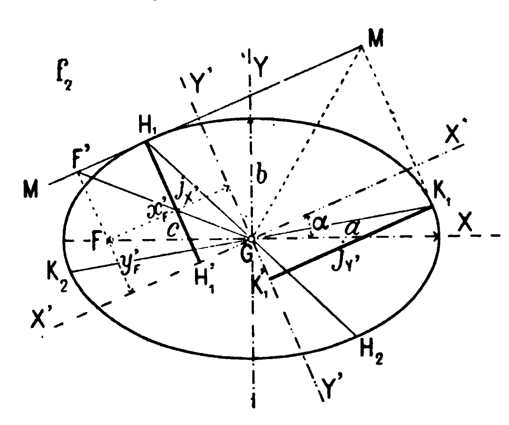
A DEUX DROITES P,Q ($\Sigma pq\,d\omega$, moment centrifuge[1], f_1)



CHAPITRE I

MOMENTS PAR RAPPORT A DEUX AXES PASSANT PAR LE CENTRE DE GRAVITÉ

§ 1. — *LES DEUX AXES SONT RECTANGULAIRES* (f_2)



Traçons les diamètres H_1H_2, K_1K_2 conjugués à GX', GY' : abaissons les perpendiculaires $H_1H_1' = j_{X'}$ $K_1K_1' = j_{Y'}$

Ce sont les rayons de gyration relatifs aux axes X' et Y'

$\Sigma y'^2 d\omega = I_{X'^2} = \Omega j^2_{X'}$. *C'est le moment d'inertie par rapport à* GX' *de la surface* Ω *concentrée en* H_1.

$\Sigma x'^2 d\omega = I_{Y'^2} = \Omega j^2_{Y'}$. *C'est le moment d'inertie par rapport à* GY' *de la surface* Ω *concentrée en* K_1.

Art. 1. — On a les moments $I_{X^2} = \Omega b^2$, $I_{Y^2} = \Omega a^2$ par rapport aux axes GX, GY de l'ellipse centrale d'inertie. Calculer les moments $I_{X'^2}$, $I_{Y'^2}$, $I_{X'Y'}$ par rapport à deux autres axes rectangulaires GX', GY'.

$\Sigma x'y'd\omega$ (moment centrifuge) $= I_{X'Y'} = \Omega\,(a^2 - b^2)\sin\alpha\cos\alpha$

$$= \Omega \times c\sin\alpha \times c\cos\alpha = \Omega x'_F\, y'_F$$

C'est le moment centrifuge par rapport à GX', GY' *de la surface* Ω *concentrée à un foyer.*

Les tangentes en H_1, K_1, les points H_1, K_1 sont très simplement obtenus en considérant l'ellipse comme la projection du cercle de rayon a.

Art. 2. — On a les moments $I_{X'^2} = \Omega j^2_{X'}$, $I_{Y'^2} = \Omega j^2_{Y'}$, $I_{X'Y'}$ par rapport à deux axes rectangulaires quelconques GX', GY'. Trouver les directions GX, GY et les longueurs a, b, des axes de l'ellipse centrale.

GX est incliné sur GX' d'un angle α tel que : $\operatorname{tg} 2\alpha = \dfrac{2\,I_{X'Y'}}{I_{Y'^2} - I_{X'^2}}$

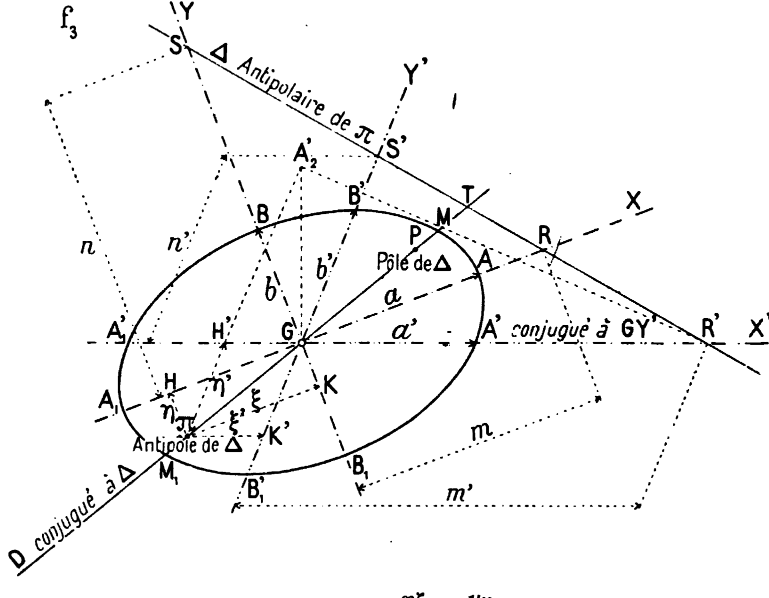
$$a^2 + b^2 = j^2_{X'} + j^2_{Y'} = \overline{GM}^2 \qquad a^2 - b^2 = c^2 = \frac{2\,I_{X'Y'}}{\Omega\sin 2\alpha}$$

Avec c, on place sur GX le foyer F : à $j_{X'}$ de GX', on mène la droite MM, (c'est une tangente). On abaisse sur elle la perpendiculaire FF' ; $F'G = a$.

1. — Désignation acceptée, sans doute à défaut d'une meilleure, par Culmann, Ritter, par MM. Guidi, Kœchlin....

§ 2. — *LES DEUX AXES SONT DEUX DIAMÈTRES CONJUGUÉS DE L'ELLIPSE CENTRALE D'INERTIE*

Art. 1. — Antipôle π d'une droite Δ, antipolaire Δ d'un point π, par rapport à une ellipse donnée par ses axes a, b ou par deux diamètres conjugués a', b' (f_3).



Soient une droite Δ et P son pôle. Son antipôle π est le symétrique de P par rapport au centre G.

Δ est polaire de P, antipolaire de π : elle est conjuguée au diamètre D de P et π.

G est entre π et Δ. Si Δ coupe l'ellipse, π est hors de l'ellipse et réciproquement : si Δ passe par G, π est à l'infini sur D.

L'équation de Δ est, rapportée :

aux axes principaux GX, GY : $\dfrac{x\xi}{a^2} + \dfrac{y\eta}{b^2} = -1$

à 2 diamètres conjugués GX', GY' : $\dfrac{x'\xi'}{a'^2} + \dfrac{y'\eta'}{b'^2} = -1$

Sont « anticonjugués » [2] les points des groupes (f_3)

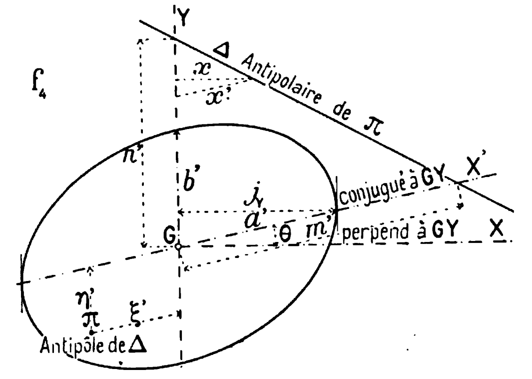
H,R A,A$_1$ K,S B,B$_1$ H',R' A',A'$_1$ K',S' B',B$_1$' π,T M,M$_1$

c'est-à-dire que : $m\xi = a^2$ $n\eta = b^2$ $m'\xi' = a'^2$ $n'\eta' = b'^2$ $GT \times G\pi = \overline{GM}^2$

Ayant R' (du groupe H'R', A'A'$_1$), on aura ainsi H' : élever une perpendiculaire GA'$_2$ $= a'$, joindre R'A'$_2$, mener A'$_2$H' perpendiculaire à R'A'$_2$; ayant H', on fera de même pour avoir R'.

Art. 2. — Deux expressions du moment d'inertie.

Soient (f_4) GX' GY 2 diamètres conjugués — Δ une droite quelconque les coupant à m', n' de G — π (ξ' η') l'antipôle de Δ.

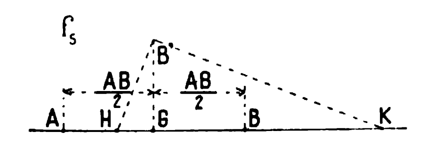


$$I_{Y'}\left(\begin{matrix}\text{les } x \text{ comptés}\\ \text{parall. à GX}\end{matrix}\right) = \Sigma x^2 d\omega = \Omega j_Y^2$$
$$= \Omega a'^2 \cos^2\theta$$

$$I_{Y'}\left(\begin{matrix}\text{les } x \text{ comptés}\\ \text{parall. à GX'}\end{matrix}\right) = \Sigma x'^2 d\omega = \frac{1}{\cos^2\theta} \Sigma x^2 d\omega$$
$$= \Omega a'^2 = m'\xi\Omega$$

$$I_{X'}\left(\begin{matrix}\text{les } y \text{ arrêtés}\\ \text{à GX'}\end{matrix}\right) = \Sigma y'^2 d\omega = \Omega b'^2 = n'\eta'\Omega$$

Le moment centrifuge est nul.



2. — Soient (f_5) A, B, 2 points : G le milieu de AB ; si H et K sont « anticonjugués » par rapport à A,B

$$GK \times GH = \overline{GB}^2$$

G est entre H et K

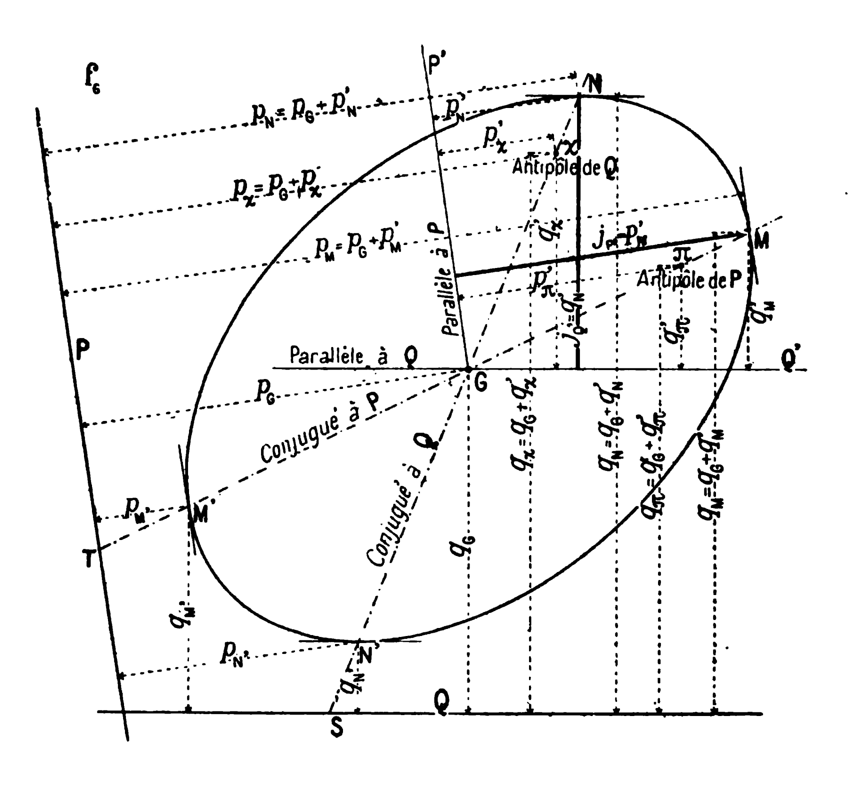
Elevons la perpendiculaire GB' = GB. Fixons en B' le sommet d'un angle droit : ses côtés coupent AB en 2 points anticonjugués de A et B.

MOMENTS PAR RAPPORT A DES AXES P, Q NE PASSANT PAS PAR LE CENTRE DE GRAVITÉ

§ 1. — 1re EXPRESSION. — *EN FONCTION DES MOMENTS PAR RAPPORT AUX AXES PARALLÈLES* P', Q' *PASSANT PAR LE CENTRE DE GRAVITÉ ET DES DISTANCES DE CE CENTRE A* P *ET* Q (f_6)

$$\Sigma p^2 d\omega = I_{P^2} = I_{P'^2} + \Omega p_G^2 = \Omega(j_{P'}^2 + p_G^2)$$
$$\Sigma q^2 d\omega = I_{Q^2} = I_{Q'^2} + \Omega q_G^2 = \Omega(j_{Q'}^2 + q_G^2)$$
$$\Sigma pq d\omega = I_{PQ} = I_{P'Q'} + \Omega p_G q_G$$

Les moments par rapport à deux axes P, Q *sont égaux aux moments par rapport à deux axes parallèles* P', Q' *menés par le centre de gravité, augmentés des moments par rapport aux axes* P, Q *de la surface* Ω *concentrée au centre de gravité.*



§ 2. — 2me EXPRESSION *EN FONCTION DES COORDONNÉES DES EXTRÉMITÉS DES DIAMÈTRES CONJUGUÉS AUX AXES DES MOMENTS*

$$j_{P'}^2 + p_G^2 = \frac{1}{2}\left(p_M^2 + p_{M'}^2\right)$$
$$j_{Q'}^2 + q_G^2 = \frac{1}{2}\left(q_N^2 + q_{N'}^2\right)$$

On obtient le moment d'inertie par rapport à un axe en concentrant $\frac{\Omega}{2}$ *aux extrémités du diamètre conjugué à cet axe.*

$$I_{PQ} = \frac{\Omega}{2}\left[p_M q_M + p_{M'} q_{M'}\right] = \frac{\Omega}{2}\left[p_N q_N + p_{N'} q_{N'}\right]$$

On obtient le moment centrifuge par rapport à deux axes en concentrant $\frac{\Omega}{2}$ *aux extrémités du diamètre conjugué à l'un des axes.*

Pour P' et Q', $p_M = p_{M'} = p'_M$, $q_M = q_{M'} = q'_M$ ....

$$I_{P'Q'} = \Omega p'_M q'_M = \Omega p'_N q'_N$$

§ 3. — 3me EXPRESSION. — *EN FONCTION DES DISTANCES AUX AXES D'UN ANTIPÔLE ET DU CENTRE DE GRAVITÉ (Théorème de Culmann.)*[3]

Art. 1. — Moment centrifuge.

Soient (f_4) π, χ les antipôles de 2 axes P et Q par rapport à l'ellipse centrale de la surface Ω

On a trouvé :

au § 1 $I_{PQ} = I_{P'Q'} + \Omega p_G q_G$, au § 2 $I_{P'Q'} = \Omega p'_M q'_M = \Omega p'_N q'_N$

$$\text{d'où : } I_{PQ} = \Omega(p_G q_G + p'_M q'_M \text{ ou } p'_N q'_N) = \Omega p_G \left\{ q_G + \frac{p'_M q'_M}{p_G} \right\} = \Omega q_G \left\{ p_G + \frac{p'_N q'_N}{q_G} \right\}$$

Comme π et χ sont les antipôles de P et Q,

$$\overline{GM}^2 = G\pi \times GT \quad \text{ou} \quad \frac{GM}{GT} = \frac{G\pi}{GM} \quad \text{ou} \quad \frac{p'_M}{p_G} = \frac{q'_\pi}{q'_M} \quad \text{ou} \quad \frac{p'_M q'_M}{p_G} = q'_\pi$$

$$\overline{GN}^2 = G\chi \times GS \quad \text{ou} \quad \frac{GN}{GS} = \frac{G\chi}{GN} \quad \text{ou} \quad \frac{q'_N}{q_G} = \frac{p'_\chi}{p'_N} \quad \text{ou} \quad \frac{p'_N q'_N}{q_G} = p'_\chi$$

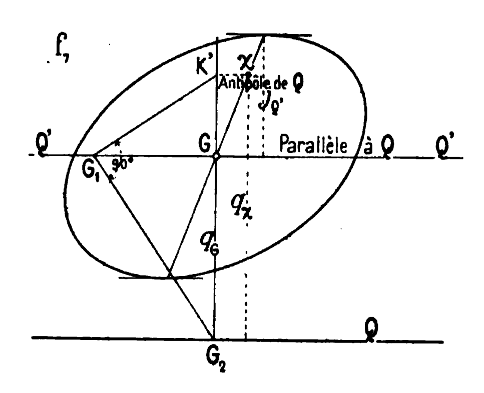
Donc : $I_{P,Q} = \Omega p_G q_\pi = \Omega q_G p_\chi$

Ainsi *le moment centrifuge de Ω par rapport à P et Q est égal au produit de Ω par 2 distances : celle du centre de gravité à l'un des axes ; celle de l'antipôle de cet axe à l'autre axe.*

Art. 2. — Moment d'inertie.

Si les 2 axes P et Q se confondent, I_{PQ} est le moment d'inertie :

$$I_{Q^2} = \Omega q_G \, q_\chi \; (f_1).$$



Le moment d'inertie de Ω par rapport à l'axe Q est égal au produit de Ω par les distances à Q du centre de gravité et de l'antipôle de Q :

au § 1, on a trouvé : $I_{Q^2} = \Omega(j^2_{Q'} + q^2_G)$

On a donc $j^2_{Q'} + q^2_G = q_G q_\chi \qquad q_\chi = \dfrac{j^2_{Q'}}{q_G} + q_G$

D'où cette construction simple de la distance à un axe Q de son antipôle :

prendre $GG_1 = j_{Q'}$; tirer G_1G_2. Lui élever en G_1 une perpendiculaire G_1K' : $K'G_2 = q_\chi$

3. — Culmann — Professeur à l'Ecole Polytechnique de Zurich. « *Die graphische Statik* ». Zurich, chez Meyer et Zeller. 1re édition 1866 — 2me édition 1875. Le 1er volume seul en a paru. Il a été traduit par MM. Glasser, Jacquier et Valat — Paris. Dunod 1880.
L'expression du moment centrifuge en fonction de la distance des antipôles est indiquée dans l'édition de 1875 (*allemand p. 404 — traduction française, p. 377-378*).

TITRE II

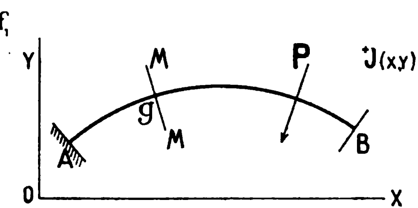
COMMENT, EN PRINCIPE, ON DÉTERMINE LES RÉACTIONS DES APPUIS DUES A UNE FORCE P MÉTHODE, FORMULES

CHAPITRE I

MOUVEMENTS, SOUS L'ACTION D'UNE FORCE **P** (f_1), D'UN POINT **J** (X,Y) INVARIABLEMENT LIÉ A UNE RETOMBÉE **B**, SUPPOSÉE LIBRE, D'UN ARC ÉLASTIQUE DONT L'AUTRE RETOMBÉE **A** DEMEURE IMMOBILE

§ 1. — *PRÉLIMINAIRES*

Considérons un arc inarticulé, symétrique par rapport au plan vertical YOX (f_1). On suppose que toutes les forces extérieures agissent dans ce plan.[1]



A B, sa fibre moyenne, est le lieu des centres de gravité des sections transversales, telles que Mg M, faites par des plans normaux au plan YOX, et dont les traces MM sur ce plan sont également inclinées sur l'intrados et l'extrados ; c'est, en pratique, la ligne des milieux des joints normaux à l'intrados.[1]

Appliquons à l'arc une force P.

Dans la réalité, ses deux retombées A, B resteront immobiles ; mais imaginons que la retombée de gauche A demeure seule fixe sur son appui, et que celle de droite B soit libre.

Sous l'action de P, la partie de l'arc entre l'appui de gauche A et P se déformera ; celle entre P et l'appui de droite ne subira aucune déformation, mais sera entraînée par les mouvements de celle de gauche.

On va étudier les mouvements d'un point J(X,Y) invariablement lié à l'extrémité B, c'est-à-dire calculer les variations $\mathcal{D}$X, $\mathcal{D}$Y de ses coordonnées et déterminer de quel angle $\mathcal{D}\theta$ il tourne, et autour de quel point.

On calculera successivement : d'abord, les variations dX, dY, $d\theta$, dues à la déformation d'une tranche infiniment mince telle que MM (f_1) ; puis les variations ΔX, ΔY, $\Delta\theta$, pour une tranche d'épaisseur finie dans laquelle sont constants le coefficient d'élasticité E et le moment d'inertie I de la section transversale de l'arc ; enfin, les variations $\mathcal{D}$X, $\mathcal{D}$Y, $\mathcal{D}\theta$, pour la déformation de l'ensemble de toutes les tranches de l'arc entre l'appui immobile de gauche A et la force P.

§ 2. — *VARIATIONS* dX, dY, *DUES A LA DÉFORMATION D'UNE TRANCHE INFINIMENT MINCE* *ANGLE DE ROTATION* $d\theta$ *ET CENTRE DE ROTATION*

Art. 1. — Effort normal N. Couple de flexion $\mathfrak{M}$ (f_2).

Au point S (f_2), je décompose P en :

N, perpendiculaire à MM, effort normal qui contracte ou dilate la tranche ;

T suivant MM, effort tangentiel, dit effort tranchant, qui produit un glissement transversal à la fibre moyenne : dans les voûtes en maçonnerie, on convient de le négliger.[1]

1. — Dit, Tome III, p. 351.

Par g, je mène deux forces égales et parallèles à N et de sens contraires, N', N''.

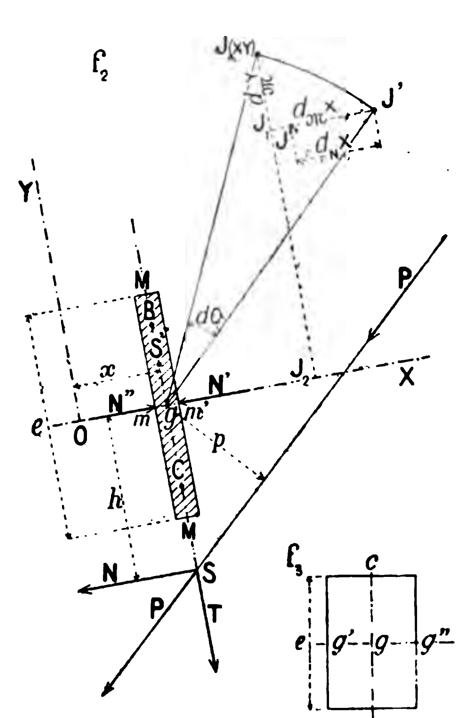
MM est soumis :

à l'effort normal $N' = N$, appliqué en g ;

au couple de flexion (ou moment fléchissant) $\mathfrak{M} = N \times h = P \times p$

Art. 2. — Effet du couple de flexion $\mathfrak{M}$.

$\mathfrak{M}$ fait tourner la face m' de la tranche par rapport à la face m (f_2) d'un angle $d\theta$.



Dans les cours de Résistance des Matériaux, on enseigne que :

$$d\theta = \frac{\mathfrak{M}\, dx}{\mathrm{E\,I}} = \frac{\mathrm{P}p\, dx}{\mathrm{E\,I}}$$

E, coefficient d'élasticité de l'arc en MM ;

I, moment d'inertie de la section MM par rapport à l'axe transversal $g'g''$ (f_3). Cette section est (en négligeant le fruit transversal, s'il y en a un) un rectangle de largeur c, de hauteur $e = $ MM (épaisseur de l'arc en M)

$$\mathrm{I} = \frac{1}{12}\, c\, e^3$$

Sous l'action de $\mathfrak{M}$, J, invariablement lié à l'extrémité de droite de l'arc supposée libre, tourne de $d\theta$ autour de g et vient en J'.

Arc $\mathrm{J\,J'} = g\,\mathrm{J}\, d\theta$ D'où :[2]

$$d_{\mathfrak{M}}\mathrm{X} = -\mathrm{Y}d\theta \qquad d_{\mathfrak{M}}\mathrm{Y} = (\mathrm{X} - x)\, d\theta$$

Art. 3. — Effet de l'effort normal N.

N' produit suivant OX une compression ou un allongement :

$$\frac{\mathrm{N}\, dx}{\mathrm{E}\Omega} = \frac{\mathrm{P}p\, dx}{h\mathrm{E}\Omega}$$

J, déjà venu en J' sous l'action du couple Pp, vient sous l'action de N' en J'' (f_2). J' J'' est parallèle à OX et égal à l'allongement ou au raccourcissement de la tranche :

$$d_{\mathrm{N}}\mathrm{X} = \mathrm{J'\,J''} = \frac{\mathrm{P}p\, dx}{h\mathrm{E}\Omega}$$

Art. 4. — Effet résultant.

$$d\mathrm{X} = d_{\mathfrak{M}}\mathrm{X} + d_{\mathrm{N}}\mathrm{X} = \frac{\mathrm{P}p\, dx}{\mathrm{E\,I}}\left(-\mathrm{Y} + \frac{\mathrm{I}}{h\Omega}\right) = -\frac{\mathrm{P}p\, dx}{\mathrm{E\,I}}\left(\mathrm{Y} - \frac{e^2}{12\,h}\right)$$

$$d\mathrm{Y} = d_{\mathfrak{M}}\mathrm{Y} = \frac{\mathrm{P}p\, dx}{\mathrm{E\,I}}(\mathrm{X} - x)$$

J peut donc venir directement en J'' en tournant de $d\theta = \frac{\mathrm{P}p\, dx}{\mathrm{EI}}$ autour de S' $\left(x,\ \frac{e^2}{12\,h}\right)$ point de la section M « anticonjugué » de S par rapport à deux points B, C, tels que $g\mathrm{B} = g\mathrm{C} = \frac{e}{\sqrt{12}}$

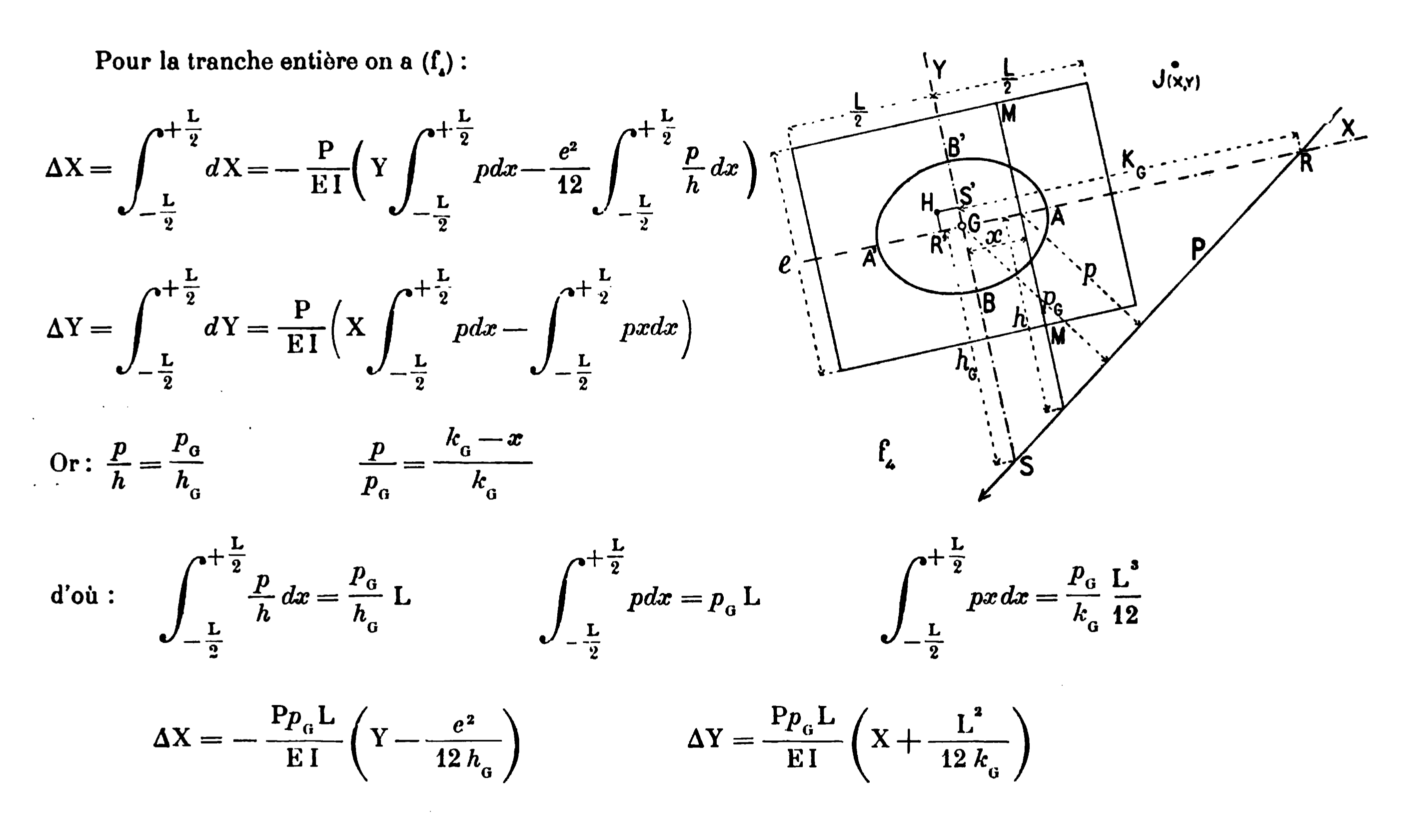
2. — Les deux triangles rectangles J J' J_1, g J J_2 (f_2) sont semblables ; on a (au signe près) :

$$\frac{d_{\mathfrak{M}}\mathrm{X}}{\mathrm{Y}} = \frac{d_{\mathfrak{M}}\mathrm{Y}}{\mathrm{X} - x} = \frac{\mathrm{J\,J'} = g\,\mathrm{J}\, d\theta}{g\,\mathrm{J}} = d\theta$$

Les $d\theta$, comme les Pp, sont > 0 dans le sens OX vers OY.

§ 3. — *VARIATIONS* ΔX, ΔY *DUES A LA DÉFORMATION D'UNE TRANCHE RECTANGULAIRE EN ÉLÉVATION DE LONGUEUR FINIE* L, *DANS LAQUELLE* E *ET* I *PEUVENT ÊTRE SUPPOSÉS CONSTANTS*

Pour la tranche entière on a (f_4) :



$$\Delta X = \int_{-\frac{L}{2}}^{+\frac{L}{2}} dX = -\frac{P}{EI}\left(Y\int_{-\frac{L}{2}}^{+\frac{L}{2}} p dx - \frac{e^2}{12}\int_{-\frac{L}{2}}^{+\frac{L}{2}} \frac{p}{h} dx\right)$$

$$\Delta Y = \int_{-\frac{L}{2}}^{+\frac{L}{2}} dY = \frac{P}{EI}\left(X\int_{-\frac{L}{2}}^{+\frac{L}{2}} p dx - \int_{-\frac{L}{2}}^{+\frac{L}{2}} p x dx\right)$$

Or : $\frac{p}{h} = \frac{p_G}{h_G}$ $\qquad \frac{p}{p_G} = \frac{k_G - x}{k_G}$

d'où : $\int_{-\frac{L}{2}}^{+\frac{L}{2}} \frac{p}{h} dx = \frac{p_G}{h_G} L$ $\qquad \int_{-\frac{L}{2}}^{+\frac{L}{2}} p dx = p_G L$ $\qquad \int_{-\frac{L}{2}}^{+\frac{L}{2}} p x dx = \frac{p_G}{k_G}\frac{L^3}{12}$

$$\Delta X = -\frac{P p_G L}{EI}\left(Y - \frac{e^2}{12 h_G}\right) \qquad \Delta Y = \frac{P p_G L}{EI}\left(X + \frac{L^2}{12 k_G}\right)$$

Les axes de l'ellipse centrale de la tranche sont : $a = \frac{L}{\sqrt{12}}$ $\qquad b = \frac{e}{\sqrt{12}}$

Soit H le point de coordonnées : $GR' = \frac{a^2}{k_G}$ $\qquad GS' = \frac{b^2}{h_G}$

R' et S' sont les anticonjugués des traces R et S de P par rapport aux sommets de l'ellipse AA', BB'.

H est donc l'antipôle de la force P.

Ainsi P fait tourner de $\frac{P p_G L}{EI}$ *autour de son antipôle la section extrême de droite de la tranche.*

§ 4. — *VARIATIONS* $\mathcal{D}$X, $\mathcal{D}$Y *DUES A LA DÉFORMATION D'UNE SUITE DE TRANCHES RECTANGULAIRES EN ÉLÉVATION DANS CHACUNE DESQUELLES* **E** *ET* **I** *PEUVENT ÊTRE SUPPOSÉS CONSTANTS*

Art. 1. — Pour un point quelconque invariablement lié à l'appui libre. Ellipse élastique. Centre élastique.

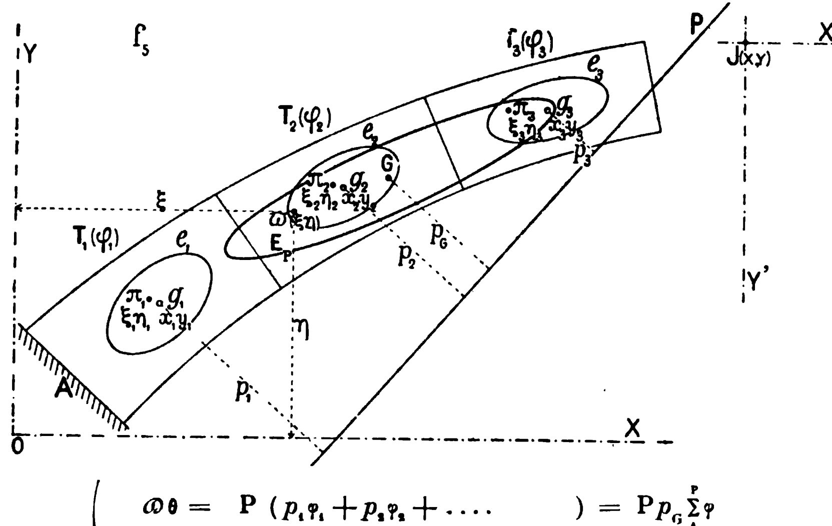
Par la déformation de toutes les tranches à gauche de P, un point J invariablement lié à l'extrémité de droite B aura tourné de :

$$\mathcal{D}\theta = \Sigma\Delta\theta = \mathrm{P}\left(\frac{p_1 \mathrm{L}_1}{\mathrm{E}_1 \mathrm{I}_1} + \frac{p_2 \mathrm{L}_2}{\mathrm{E}_2 \mathrm{I}_2} + \ldots \quad \ldots\right)$$

Posons :

$$\varphi_1 = \frac{\mathrm{L}_1}{\mathrm{E}_1 \mathrm{I}_1}, \quad \varphi_2 = \frac{\mathrm{L}_2}{\mathrm{E}_2 \mathrm{I}_2}, \ \ldots$$

quantités dites par Ritter : poids élastiques.[3]



Traçons (f_5) les ellipses centrales d'inertie e_1, e_2,... des rectangles T_1, T_2,...

Soient $\xi_1, \eta_1, \xi_2, \eta_2$,... les coordonnées des antipôles π_1, π_2, ... de P par rapport à ces ellipses.

$$\left\{\begin{aligned}
\mathcal{D}\theta &= \mathrm{P}\,(p_1\varphi_1 + p_2\varphi_2 + \ldots \quad) = \mathrm{P}p_G \sum_A^P \varphi \\
\mathcal{D}\mathrm{X} &= \Sigma\Delta\mathrm{X} = -\mathrm{P}\,[p_1\varphi_1(\mathrm{Y}-\eta_1) + p_2\varphi_2(\mathrm{Y}-\eta_2) + \ldots] \\
&= -\mathrm{PY}\,(p_1\varphi_1 + p_2\varphi_2 + \ldots) + \mathrm{P}\,(p_1\eta_1\varphi_1 + p_2\eta_2\varphi_2 + \ldots) \\
\mathcal{D}\mathrm{Y} &= \Sigma\Delta\mathrm{Y} = \mathrm{P}\,[p_1\varphi_1(\mathrm{X}-\xi_1) + p_2\varphi_2(\mathrm{X}-\xi_2) + \ldots] \\
&= \mathrm{PX}\,(p_1\varphi_1 + p_2\varphi_2 + \ldots) - \mathrm{P}\,(p_1\xi_1\varphi_1 + p_2\xi_2\varphi_2 + \ldots)
\end{aligned}\right.$$

Le produit $p_1\eta_1\varphi_1$ est le moment centrifuge[4] par rapport à P et à OX de la masse φ_1 uniformément étalée sur le rectangle T_1 : $p_1\xi_1\varphi_1$ est son moment centrifuge par rapport à P et à OY.

Traçons l'ellipse centrale d'inertie E_P du système de masses $\varphi_1, \varphi_2, \ldots$ étalées sur les tranches rectangulaires $T_1, T_2, \ldots$ entre l'appui A et P.

Soit $\varpi\,(\xi, \eta)$ l'antipôle par rapport à E_P de la force P.

$$\sum_A^P p_1\eta_1\varphi_1 = p_G\,\eta \sum_A^P \varphi \ ^4 \qquad\qquad \sum_A^P p_1\xi_1\varphi_1 = p_G\,\xi \sum_A^P \varphi \ ^4$$

Donc :

$$\frac{\mathcal{D}\theta}{\mathrm{P}}\left(\begin{smallmatrix}\text{rotation}\\ \text{pour une}\\ \text{force 1}\end{smallmatrix}\right) = p_G \sum_A^P \varphi \text{ moment statique des } \varphi \text{ par rapport à P.}$$

3. — Ritter : « Anwendungen der graphischen Statik » Zurich 1888 (Applications de la statique graphique 1re Partie, p. 155).

4. — Théorème de Culmann p. 122.

Déplacement de J (X,Y) sous une force 1

suivant JY'

$\frac{\mathcal{D}Y}{P} = (X - \xi)\, p_G \sum_A^P \varphi = (X - \xi)$ distance de ϖ (antipôle, centre de rotation) à la direction JY' du déplacement $\times\, p_G \sum_A^P \varphi$, moment statique des φ par rapport à P, lequel est la rotation autour de ϖ.

$= \sum_A^P \varphi$ (somme des poids élastiques) $\times\, p_G$ (distance à P du centre de gravité des φ) $\times\, (X - \xi)$ distance à la direction JY' de l'antipôle ϖ.

$=$ Moment centrifuge des φ par rapport à P et JY'

suivant JX'

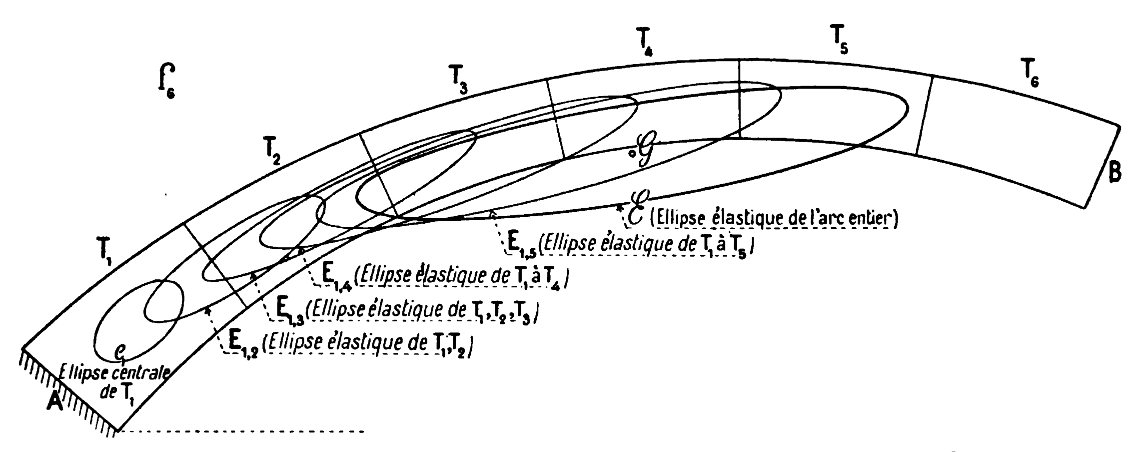
$\frac{\mathcal{D}X}{P} = -(Y - \eta)\, p_G \sum_A^P \varphi = -(Y - \eta)$ distance de ϖ (antipôle, centre de rotation) à la direction JX' du déplacement $\times\, p_G \sum_A^P \varphi$ moment statique des φ par rapport à P, lequel est la rotation autour de ϖ.

$= \sum_A^P \varphi$ (somme des poids élastiques) $\times\, p_G$ (distance à P du centre de gravité des φ) $\times\, (Y - \eta)$ distance à la direction JX' de l'antipôle ϖ.

$=$ Moment centrifuge des φ par rapport à P et JX'.

Ainsi une force P produit sur l'extrémité libre B et sur tout point J qui lui est invariablement lié, une rotation $P p_G \sum_A^P \varphi$ autour de son antipôle par rapport à l'ellipse centrale des poids élastiques φ_1, φ_2, ... entre l'appui fixe et P (E_P de f_6). Appelons-la l'ellipse « élastique »[5] de cette partie d'arc.

L'ellipse centrale $\mathcal{E}$ (f_6) de toutes les masses φ jusqu'à l'appui de droite est l'ellipse « élastique »[5] de l'arc : son centre $\mathcal{G}$ est le centre élastique ; c'est le centre de gravité des masses φ concentrées aux centres des ellipses des tranches.



5. — Culmann a, le premier, indiqué cette ellipse* : il l'appelait « ellipse centrale des $\frac{ds}{EI}$ ». Son successeur à l'Ecole de Zurich, W. Ritter en a fort développé l'application**, sous le nom d'ellipse d'élasticité.

Comme on désigne ainsi une autre ellipse, on peut appeler celle-ci « ellipse élastique ».

On arrive vite à la notion de cette ellipse, mais à l'aide de théorèmes qui ne sont pas couramment enseignés dans nos cours. Sur ce sujet, on lira très utilement : de Ritter, un appendice à la 3e Partie de ses « *Applications de la Statique graphique* »*** ; de M. le Professeur Guidi : « *l'Ellisse di Elasticità nella scienza delle costruzioni* » Turin 1904.

J'ai suivi une méthode moins élégante, qui ne suppose que des connaissances élémentaires usuelles.

* Culmann « *Die graphische Statik* » — p. 122 renvoi 3 — Traduction française p. 530.

** Ritter « *Anwendungen der graphischen Statik nach Professor Culmann.* (2me Partie p. 117, 169 Zurich, 1890 — *** 3e Partie p. 259 Zurich, 1900 — 4e Partie p. 197 Zurich, 1906).

Les rotations $Pp_1\varphi_1$, $Pp_2\varphi_2$, ... s'effectuent autour de l'antipôle de P par rapport aux ellipses des tranches T_1 T_2, ... (f_5) Elles se composent comme des forces parallèles[6] en une rotation résultante autour de ϖ antipôle de P par rapport à l'ellipse élastique de l'ensemble des tranches à gauche de P, antipôle qui est ainsi le centre de gravité des rotations $Pp_1\varphi_1$, $Pp_2\varphi_2$, ... appliquées aux antipôles de P par rapport aux ellipses de chaque tranche.

Art. 2. — Pour le centre élastique de l'arc.

Considérons le centre élastique $\mathcal{G}$, de l'arc entier comme invariablement lié à l'appui libre B (f_5) ; prenons-le comme origine des coordonnées et calculons ses déplacements.

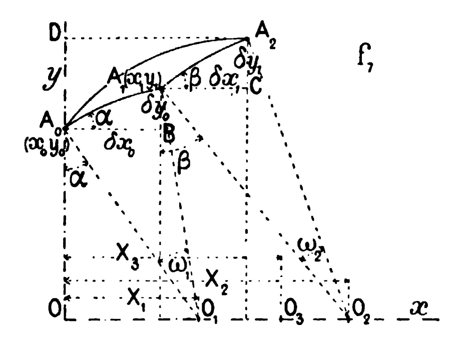
Les formules de l'art. 1, avec X = 0 Y = 0, deviennent :

$$\frac{\mathcal{D}\theta}{P}\begin{pmatrix}\text{rotation}\\ \text{sous une}\\ \text{force 1}\end{pmatrix} = p_G \sum_A^P \varphi \text{ moment statique des } \varphi \text{ par rapport à P.}$$

Déplacements du centre élastique sous une force 1

Suivant $\mathcal{G}Y$: $\frac{\mathcal{D}Y}{P} = -\xi p_G \sum_A^P \varphi$ = Moment statique des φ par rapport à P $\times$ distance à $\mathcal{G}Y$, direction du déplacement, de l'antipôle ϖ de P par rapport à l'ellipse E_P. = Moment centrifuge des φ par rapport à P et à $\mathcal{G}Y$.

Suivant $\mathcal{G}X$: $\frac{\mathcal{D}X}{P} = \eta p_G \sum_A^P \varphi$ = Moment statique des φ par rapport à P $\times$ distance à $\mathcal{G}X$ de l'antipôle ϖ de P = Moment centrifuge des φ par rapport à P et à $\mathcal{G}X$.



f_7

6. — Soit (f_7) un point A_0 soumis successivement aux 2 rotations :

ω_1 autour de O_1 — qui l'amène en A_1 $A_0 A_1 = O_1 A_0 \times \omega_1$

ω_2 autour de O_2 — qui l'amène en A_2 $A_1 A_2 = O_2 A_1 \times \omega_2$

Prenons, pour axe des x, $O_1 O_2$, pour axe des y, la perpendiculaire à $O_1 O_2$ passant par A_0

$$\delta x_0 = A_0 A_1 \cos\alpha = O_1 A_0 \cos\alpha \times \omega_1 = y_0 \omega_1$$
$$\delta y_0 = A_0 A_1 \sin\alpha = O_1 A_0 \sin\alpha \times \omega_1 = X_1 \omega_1$$

$$\left.\begin{aligned}\delta x_1 &= A_1 A_2 \cos\beta = O_2 A_1 \cos\beta \times \omega_2 = y_1 \omega_2 = (y_0 + \delta y_0)\,\omega_2 = y_0 \omega_2\\ \delta y_1 &= A_1 A_2 \sin\beta = O_2 A_1 \sin\beta \times \omega_2 = (X_2 - \delta x_0)\,\omega_2 = X_2 \omega_2\end{aligned}\right\}\text{ en négligeant } \omega_2\delta y_0,\ \omega_2\delta x_0$$

$$\Delta x_0 = \delta x_0 + \delta x_1 = y_0 (\omega_1 + \omega_2)$$
$$\Delta y_0 = \delta y_0 + \delta y_1 = X_1 \omega_1 + X_2 \omega_2$$

Appliquons aux points O_1, O_2 des poids ω_1, ω_2. Soit O_3 leur centre de gravité. On a, (moment par rapport à O) :

$$X_3 (\omega_1 + \omega_2) = X_1 \omega_1 + X_2 \omega_2$$

Faisons tourner A_0 de $\omega_1 + \omega_2$ autour de O_3 — Les coordonnées du déplacement sont :

$$\Delta' x_0 = y_0 (\omega_1 + \omega_2) = \Delta x_0$$
$$\Delta' y_0 = X_3 (\omega_1 + \omega_2) = X_1 \omega_1 + X_2 \omega_2 = \Delta y_0$$

Par cette rotation, A_0 vient directement en A_2.

CHAPITRE II

COMMENT, DES DÉPLACEMENTS VIRTUELS $\mathscr{D}x$, $\mathscr{D}y$, $\mathscr{D}\theta$ DU CENTRE ÉLASTIQUE DUS A UNE FORCE **P**, ON DÉDUIT LA RÉACTION DE L'APPUI $\mathbf{R}^B$ QUI LES ANNULE

§ 1. — *CAS D'UNE FORCE QUELCONQUE* **P**. *LA RÉACTION* $\mathbf{R}^B$ *EST, PAR RAPPORT A L'ELLIPSE « ÉLASTIQUE » DE TOUT L'ARC* $\mathscr{E}$, *L'ANTIPOLAIRE DE* ϖ, *ANTIPÔLE DE LA FORCE* **P** *PAR RAPPORT A L'ELLIPSE « ÉLASTIQUE »* $\mathbf{E}_P$ *DE LA PARTIE D'ARC A GAUCHE DE* **P** (f_8)

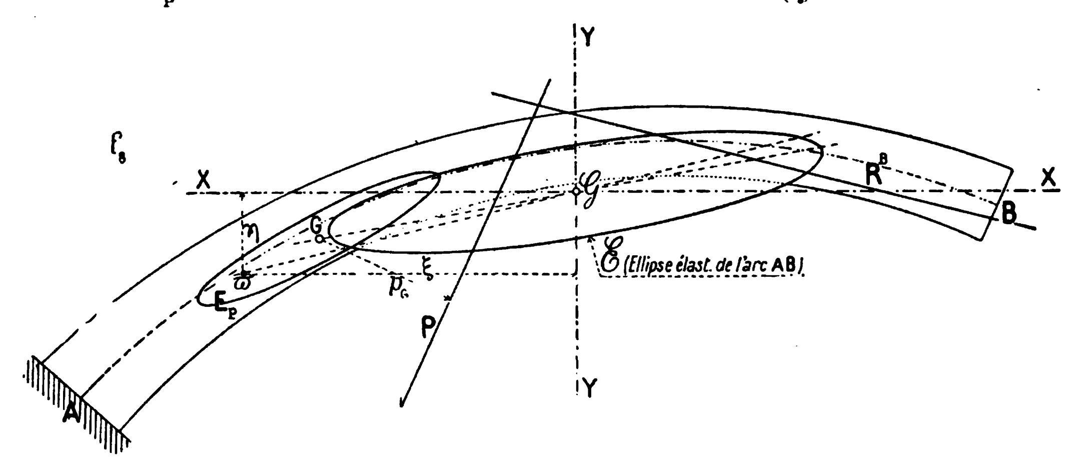
Supposons tracées :

1° l'ellipse élastique E_P de la partie d'arc à gauche de P.

2° l'ellipse élastique $\mathscr{E}$ de tout l'arc.

Soit ϖ l'antipôle de P par rapport à E_P.

P fait tourner de $Pp_G\Phi$ autour de ϖ, tout point invariablement lié à l'appui libre B.



La réaction cherchée R^B qui, elle, agit sur tout l'arc, doit produire une rotation égale et de sens contraire autour du même point ϖ ; ϖ est donc son antipôle à elle par rapport à l'ellipse élastique $\mathscr{E}$ de l'arc entier AB.

Par rapport à l'ellipse totale $\mathscr{E}$, R^B est donc l'antipolaire de ϖ, antipôle de P par rapport à l'ellipse partielle E_P.

§ 2. — *EN PRATIQUE, ON N'A A CONSIDÉRER QU'UNE FORCE VERTICALE* **V** *OU UNE HORIZONTALE* **H**

Les forces qui agissent sur un arc sont toujours supposées dans son plan de symétrie;[7] elles sont presque toutes verticales : poids mort, surcharges roulantes ; quelques-unes sont, soit horizontales :[8, 9] dilatation, freinage,[10] soit obliques : poussée d'une voûte transversale d'élégissement; celles-ci, on les décomposera en verticales et horizontales.

Je ne traiterai avec détail que le cas d'une force verticale.

7. — p. 123.

8. — Le vent est une force horizontale : mais elle n'est pas dans le plan de symétrie.

9. — La force centrifuge $\frac{PV^2}{9,81\ R}$ dans les ouvrages en courbe de rayon R, est normale aux rails : son effet est maximum quand la machine (maximum de P) est au milieu de la portée. On ne tient compte ni du vent, ni de la force centrifuge dans le calcul proprement dit de l'arc : mais on se rend compte de la quantité dont ils dévient les résultantes sur les sections d'appui, et dont ils augmentent les efforts.

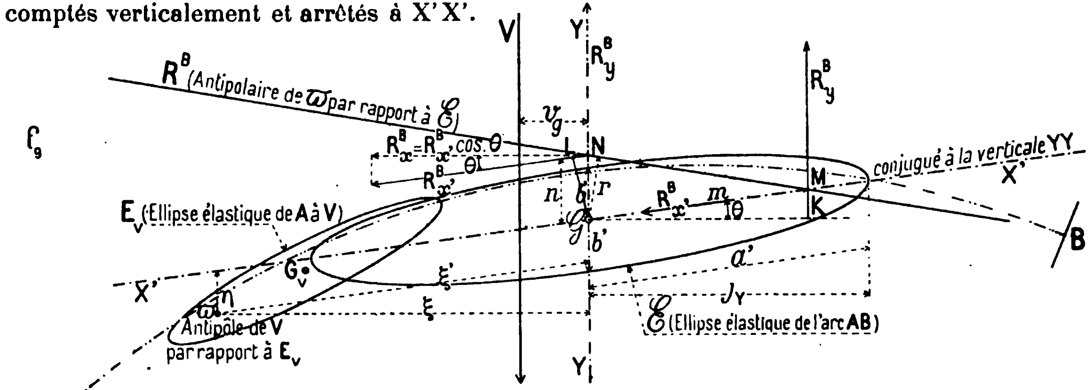
10. — On peut admettre que le frottement des roues sur les rails est le $\frac{1}{6}$ du poids freiné.

§ 3. — *CAS D'UNE FORCE VERTICALE* V

Art. 1. — Déplacements $\varpi_V\theta$, $\varpi_V X$, $\varpi_V Y$ du centre élastique $\mathcal{G}$ sous l'action de V.

Prenons (f_9) pour origine des coordonnées le centre élastique $\mathcal{G}$, pour axes la verticale YY de $\mathcal{G}$ et la direction X'X' conjuguée à la verticale par rapport à l'ellipse élastique de l'arc.

Les x sont comptés horizontalement, c'est-à-dire perpendiculairement à YY ; les y sont comptés verticalement et arrêtés à X'X'.



Supposons encore, mais seulement pour un instant, tracées :

l'ellipse élastique E_V de la partie de l'arc entre l'appui de gauche et la force V,

l'ellipse élastique $\mathcal{E}$ de l'arc.

Soit ϖ (ξ, η) l'antipôle de V par rapport à E_V.

Les déplacements du centre élastique $\mathcal{G}$ sous l'action d'une force 1 sont (p. 128) :

$\dfrac{\varpi_V\theta}{V} = V_g \sum\limits_A^V \varphi = \mathfrak{M}_V$	Moment statique par rapport à V	des poids élastiques de la partie de l'arc à gauche de V
$\dfrac{\varpi_V Y}{V} = -V_g \xi \sum\limits_A^V \varphi = \overset{V}{\underset{A}{I}}_{VY}$	Moment centrifuge par rapport à V et Y	
$\dfrac{\varpi_V X'}{V} = V_g \eta \sum\limits_A^V \varphi = \overset{V}{\underset{A}{I}}_{VX'}$	Moment centrifuge par rapport à V et X'	

Art. 2. — Déplacements $\varpi_R\theta$, $\varpi_R X$, $\varpi_R Y$ du centre élastique $\mathcal{G}$ sous l'action de R^B.

Aux points de rencontre de R^B avec les axes YY, X'X', je décompose R^B en une composante verticale R^B_y et une composante $R^B_{x'}$ parallèle à X'X' : la projection horizontale de $R^B_{x'}$ est $R^B_x = R^B_{x'} \cos\theta$.

Le moment de R^B par rapport à $\mathcal{G}$ peut s'écrire :

$$R^B_y \times \mathcal{G}K = R^B_y m \cos\theta$$

$$R^B_{x'} \times \mathcal{G}L = R^B_{x'} n \cos\theta = n\,(R^B_{x'} \cos\theta) = R^B_x n$$

L'ellipse $\mathcal{E}$ est rapportée à 2 axes conjugués a', b'. R^B est, par rapport à elle, antipolaire de ϖ (ξ, η)

$$m\xi' = a'^2 \quad \text{ou} \quad (m \cos\theta)(\xi' \cos\theta) = a'^2 \cos^2\theta \quad \text{ou} \quad m \cos\theta\,\xi = j^2_Y \text{ (rayon de giration)}$$

$$n\eta = b'^2.$$

Les déplacements de $\mathcal{G}$ sous l'action de R^B sont, (p. 128) :

$$\varpi_R\theta = R^B r \sum_A^B \varphi$$

$$\varpi_R X = R^B r\eta \sum_A^B \varphi = R^B_x n\eta \sum_A^B \varphi = R^B_x b'^2 \sum_A^B \varphi = R^B_x \sum_A^B \varphi y'^2 = R^B_x \overset{B}{\underset{A}{I}}_{X'^2}$$

$$\varpi_R Y = R^B r\xi \sum_A^B \varphi = R^B_y m \cos\theta\,\xi \sum_A^B \varphi = R^B_y j^2_Y \sum_A^B \varphi = R^B_y \sum_A^B \varphi X^2 = R^B_y \overset{B}{\underset{A}{I}}_{Y^2}$$

$\overset{B}{\underset{A}{I}}_{X'^2}$ Moment d'inertie par rapport à X'; $\overset{B}{\underset{A}{I}}_{Y^2}$ Moment d'inertie par rapport à Y — des poids élastiques de l'arc entier

Art. 3. — En égalant ces déplacements, on a R^B

Déplacements verticaux $R^B_y \overset{B}{\underset{A}{I}}_{Y^2} = - V \overset{V}{\underset{A}{I}}_{VY}$ (1) $\qquad R^B_y = V \dfrac{\overset{V}{\underset{A}{I}}_{VY}}{\overset{B}{\underset{A}{I}}_{Y^2}}$

Déplacements horizontaux $R^B_x \overset{B}{\underset{A}{I}}_{X'^2} = V \overset{V}{\underset{A}{I}}_{VX'}$ (2) $\qquad R^B_x = V \dfrac{\overset{V}{\underset{A}{I}}_{VX'}}{\overset{B}{\underset{A}{I}}_{X'^2}}$

Rotations $R^B r \overset{B}{\underset{A}{\Sigma}} \varphi = V \overset{V}{\underset{A}{\mathfrak{M}}}_V$ (3)

Avec R^B_y et $R^B_{x'}$, on a R^B et sa direction (f_{10}), puis avec (3), r sa distance à $\mathcal{G}$ (f_9)

Comme $R^B r = R^B_y m \cos\theta = R^B_x n$, on a aussi m et n :

$$m \cos\theta = \frac{R^B r}{R^B_y} = \frac{\overset{V}{\underset{A}{\mathfrak{M}}}_V}{\overset{B}{\underset{A}{\Sigma}} \varphi} \cdot \frac{\overset{B}{\underset{A}{I}}_{Y^2}}{\overset{V}{\underset{A}{I}}_{VY}} \qquad n = \frac{\overset{V}{\underset{A}{\mathfrak{M}}}_V}{\overset{B}{\underset{A}{\Sigma}} \varphi} \cdot \frac{\overset{B}{\underset{A}{I}}_{X'^2}}{\overset{V}{\underset{A}{I}}_{VX'}}$$

On indiquera plus loin comment on construit graphiquement tous ces moments.

Dans les rapports qui donnent la direction de R^B, dans m et n ses coordonnées à l'origine, l'intensité de la force V ne figure pas : la direction et la position de la réaction ne dépendent que de la position de V : on fera toutes les constructions avec la force 1.

L'intensité de R, R_y, R_x, $R_{x'}$ est proportionnelle à celle de V.

§ 4. — *LA RÉACTION* R^B *PASSE PAR LE CENTRE ÉLASTIQUE* $\mathcal{G}$ (f_{11})

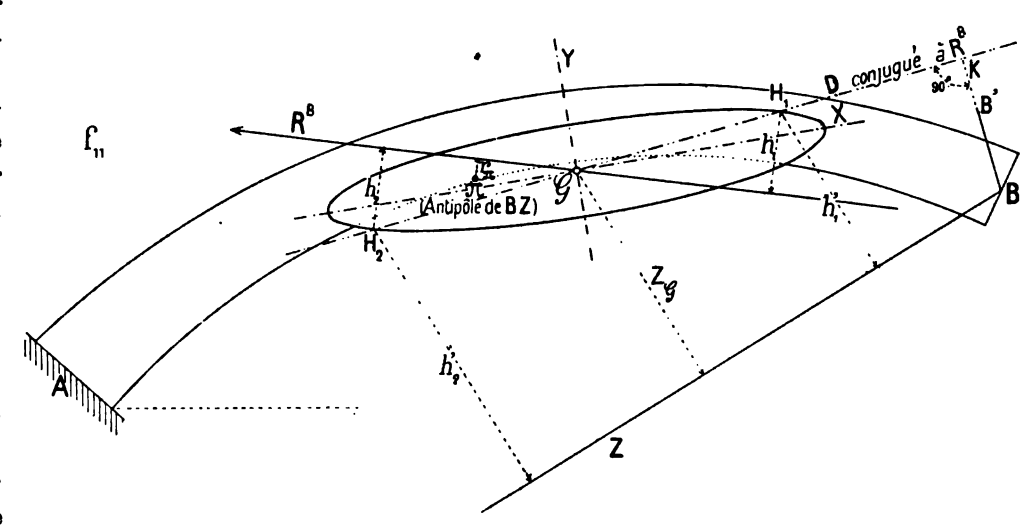
Alors son antipôle est à l'infini, sur la droite D conjuguée à R^B.

L'appui B tourne autour de ce point, c'est-à-dire se déplace normalement à D de BB'.

Ce déplacement BB' projeté sur une direction BZ est le moment centrifuge des φ par rapport à R^B et à BZ, lequel peut s'écrire :

soit[11] $R^B z_{\mathcal{G}} \; r_\pi \overset{B}{\underset{A}{\Phi}}$

soit[12] $\dfrac{R^B}{2} \overset{B}{\underset{A}{\Phi}} (h_1 h'_1 + h_2 h'_2)$



Réciproquement, si B subit une translation BB', l'antipôle de R^B est à l'infini sur un diamètre D perpendiculaire à BB'; R^B passe par le centre élastique et est conjuguée à ce diamètre.

Si R^B coïncide avec un axe de l'ellipse élastique, par exemple $\mathcal{G}$X, B se déplace normalement au conjugué de $\mathcal{G}$X qui est l'autre axe $\mathcal{G}$Y, c'est-à-dire parallèlement à $\mathcal{G}$X.

Réciproquement, si l'appui B se déplace parallèlement à un axe de l'ellipse élastique, R^B agit suivant cet axe. Un changement de température déplace horizontalement l'appui d'un arc symétrique ; la réaction correspondante passe par le centre élastique et est horizontale.

11. — Théorème de Culmann p. 122.
12. — p. 121.

TITRE III

ARC DISSYMÉTRIQUE

COMMENT, EN PRATIQUE, ON CONSTRUIT LES RÉACTIONS DES APPUIS

CHAPITRE I

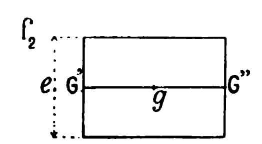
MOMENTS STATIQUES, MOMENTS D'INERTIE, MOMENTS CENTRIFUGES DES POIDS ÉLASTIQUES FUNICULAIRES 1 A 5 (Pl. I)

§. 1. — *CENTRE ÉLASTIQUE* *DIAMÈTRE DE L'ELLIPSE ÉLASTIQUE DE L'ARC* *CONJUGUÉ A LA VERTICALE*

Art. 1. — Division de l'arc en tranches T_1, T_2,.... (f_1).

On divise l'arc AB en tranches assez minces pour que l'on puisse supposer rectangulaire leur face (par exemple CDEF), et, constant, le moment d'inertie I de leur section transversale, supposée elle aussi rectangulaire (f_2).

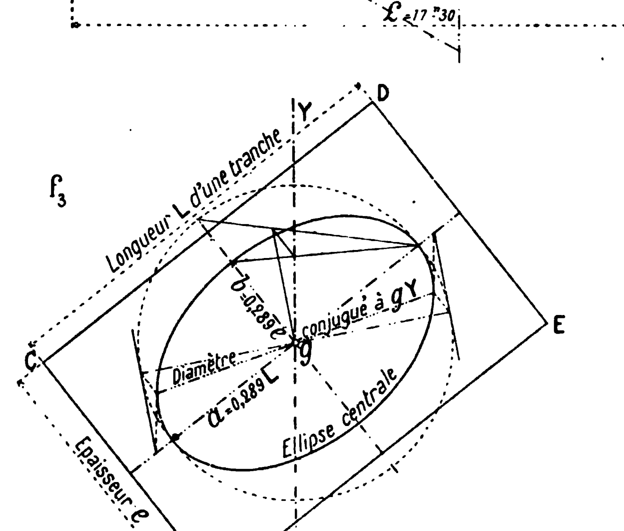
$$I = \frac{1}{12} e^3 \times G'G''$$



L'épure (Pl. I) est faite pour un arc dont les dimensions sont indiquées par f_1.

Art. 2. — Ellipse centrale d'inertie d'une tranche (f_3).

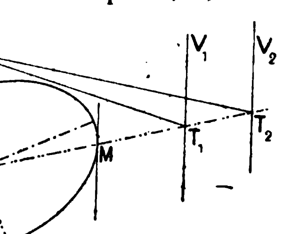
A. — Axes.



$$\begin{cases} a = \dfrac{L}{\sqrt{12}} = 0.289\,L \\ b = \dfrac{e}{\sqrt{12}} = 0{,}289\,e \end{cases}$$

Dans la pratique on ne trace pas l'ellipse.

On considère l'ellipse a, b, comme la projection du cercle de rayon a : on trace les tangentes au cercle a dsnt les projections sont verticales ; on détermine les points de tangence, on les joint.



B. — Diamètre conjugué à la verticale. (f_4).

Ce diamètre est le lieu des antipôles des verticales par rapport à l'ellipse (f_4)

$$\overline{gM'}^2 = \overline{gM}^2 = gT_1 \times gK_1 = gT_2 \times gK_2 = \ldots\ldots$$

Art. 3. — Poids élastique φ d'une tranche.

$$\varphi = \frac{\text{L (Longueur de la fibre moyenne)}}{\text{E (Coefficient d'élasticité)} \times \text{I} \left(\substack{\text{Moment d'inertie de la} \\ \text{section transversale}}\right)}$$

On ne connaît pas E pour tous les points de l'arc ; on le supposera constant et égal à 1.[1] Au demeurant, dans les formules des réactions, il est au numérateur et au dénominateur.

On prendra donc $\varphi = \dfrac{L}{I}$

TABLEAU I. — *Arc de la Pl.* I. — *Largeur* G' G'' (f_2) = 1m. — *Axes des ellipses centrales des tranches. Leurs poids élastiques.*

Nos des tranches	Longueur de la tranche L	Epaisseur de la voûte au droit des centres de gravité g e	Demi-axes de l'ellipse centrale de la tranche $a = 0.289\,L$	$b = 0.289\,e$	Moment d'inertie de la section transversale de l'arc $I = \frac{1}{12}e^3$	Poids élastique de la tranche $\varphi = \frac{L}{I}$
1	2	3	4	5	6	7
1	1m82	2m42	0m526	0m699	1.181041	1.541
2	2.01	2.06	0.580	0.595	0.728485	2.759
3	2.19	1.70	0.633	0.491	0.409417	5.349
4	2.37	1.39	0.685	0.402	0.223802	10.589
5	2.55	1.16	0.737	0.335	0.130075	19.604
6	2.75	1.03	0.795	0.298	0.091061	30.199
7	2.54	1.05	0.734	0.303	0.096469	26.329
8	2.39	1.19	0.691	0.343	0.140430	17.019
9	2.34	1.44	0.676	0.416	0.248832	9.403
					$\sum_A^B \varphi =$	122.792

L'épure (Pl. I) a été faite à l'échelle de 0m05 pour 1m puis réduite à celle de 0m01 pour 1m.

Art. 4. — Centre élastique $\mathcal{G}$ de l'arc (Centre de gravité des poids élastiques φ appliqués aux centres de gravité des tranches $g_1, g_2, \ldots$)

A. — Verticale de $\mathcal{G}$. Funiculaire **1**.

Suspendons verticalement les φ aux centres $g_1 g_2 \ldots$: traçons pour ces φ le polygone des forces de pôle O' avec une distance polaire p' : (on a pris $p' = \mathcal{L} = 17^m30$ (f_1) $= \Sigma\varphi$; c'est-à-dire que $\varphi = 1$ est représenté par $\dfrac{17^m30}{122.792} = 0^m14089$), puis le funiculaire **1** (Pl. I).

Les côtés extrêmes de **1** se coupent sur la verticale de $\mathcal{G}$.

Prolongeons les côtés de **1**. Ils interceptent sur toute verticale des longueurs qui sont, divisés par p', les moments statiquent des φ par rapport à cette verticale.

1. — Pour E dans les voûtes, voir III, p. 372 à 374, 380 à 382.

Par exemple, si elle est YY :

$$\gamma_1 = \frac{\varphi_1 x_1}{p'} \qquad \gamma_2 = \frac{\varphi_2 x_2}{p'} \qquad \ldots\ldots$$

Si c'est V_7,

$$\gamma_1^{V_7} = \frac{\varphi_1\, \mathcal{D}^{ce}(g_1, V_7)}{p'} \qquad \gamma_2^{V_7} = \frac{\varphi_2\, \mathcal{D}^{ce}(g_2, V_7)}{p'}$$

La somme $\gamma_1^{V_7} + \gamma_2^{V_7} + \ldots\ldots = \Gamma_A^{V_7}$ est, divisée par p', la somme des moments statiques par rapport à V_7 des φ de A à V_7.

B. — Horizontale de $\mathcal{G}$.

Attachons horizontalement les φ aux centres g_1, g_2 ..... Traçons pour ces φ le funiculaire auxiliaire 2α à côtés perpendiculaires aux rayons de O'.

Ses côtés extrêmes se coupent en G' sur l'horizontale de $\mathcal{G}$.

C. — Vérification par le calcul de la position de $\mathcal{G}$.

Afin d'éviter les erreurs — surtout les erreurs d'échelle — il convient de vérifier par le calcul la position de $\mathcal{G}$.

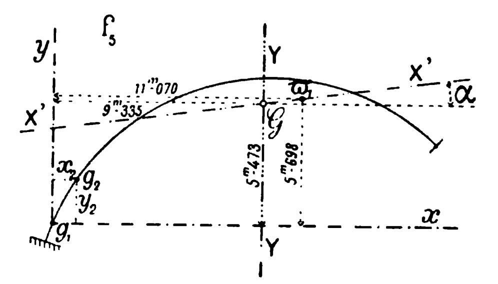


TABLEAU II. — *Moments des φ par rapport à la verticale et à l'horizontale de g_1 (f_5).*

Nos des tranches	Poids élastiques (Tableau I col. 7)	Distances des g mesurées sur une épure à l'échelle de 0m05 p. m.		Moments des φ			
				1er degré		2e degré	
		à la verticale de g_1	à l'horizontale de g_1				
	φ	x	y	φx	φy	φx^2	φxy
1	2	3	4	5	6	7	8
1	1.541	0	0	0	0	0	0
2	2.759	0m97	1m65	2.676	4.552	2.596	4.415
3	5.349	2.325	3.24	12.436	17.330	28.914	40.293
4	10.589	4.12	4.65	43.627	49.239	179.743	202.866
5	19.604	6.325	5.71	123.995	111.939	784.268	708.011
6	30.199	8.925	6.27	269.526	189.348	2405.520	1689.928
7	26.329	11.585	6.20	305.021	163.240	3533.668	1891.130
8	17.019	13.98	5.56	237.925	94.626	3326.192	1322.863
9	9.403	16.07	4.45	151.107	41.843	2428.289	672.426
	122.792			1146.313	672.117	12689.190	6531.932
	$\sum_A^B \varphi$			$\Sigma\varphi x$	$\Sigma\varphi y$	$\Sigma\varphi x^2$	$\Sigma\varphi xy$

$x_{\mathcal{G}}$ (distance entre les verticales de g_1 et de $\mathcal{G}$) $= \dfrac{\Sigma\varphi x \text{ (col. 5)}}{\Sigma\varphi \text{ (col 2)}} = \dfrac{1146.313}{122.792} = 9^{m}335$

$y_{\mathcal{G}}$ (distance entre les horizontales de g_1 et de $\mathcal{G}$) $= \dfrac{\Sigma\varphi y \text{ (col. 6)}}{\Sigma\varphi x \text{ (col 2)}} = \dfrac{672.117}{122.792} = 5^{m}473$

$\mathcal{G}$ est à 9m335 à droite de g_1, à 5m473 au-dessus. La construction graphique est exacte.

Art. 5. — Diamètre de l'ellipse élastique de l'arc conjugué à la verticale. Axe X'X'.

Dans tout ce qui va suivre, on continuera à compter les x horizontalement, c'est-à-dire perpendiculairement à l'axe vertical YY (f_2), mais les y comptés verticalement seront arrêtés à un axe X'X' conjugué à YY.

Déterminons X'X'.

C'est le lieu, par rapport à l'ellipse élastique de l'arc, des antipôles des verticales.

Il passe par le centre $\mathcal{G}$ qu'on vient de déterminer et par l'antipôle d'une verticale quelconque.

On peut le trouver par une construction graphique ; elle est longue.

Avec les nombres du Tableau II, on a tout de suite ϖ_1 antipôle de la verticale de g_1 (f_2).

$$x_{\varpi_1} \text{ (distance entre les verticales de } \varpi_1 \text{ et de } g_1) = \frac{\Sigma\varphi x^2 \text{ (Tableau II col 7)}}{x_{\mathcal{G}} (= 9^m335) \times \Sigma\varphi \text{ (Tableau I col 7)}} = \frac{12689.190}{9.335 \times 122.792} = 11^m070$$

$$y_{\varpi_1} \text{ (distance entre les horizontales de } \varpi_1 \text{ et de } g_1) = \frac{\Sigma\varphi xy \text{ (Tableau II col 8)}}{x_{\mathcal{G}} (= 9^m335) \times \Sigma\varphi \text{ (Tableau I col 7)}} = \frac{6531.932}{9.335 \times 122.792} = 5^m698$$

$$\text{tang}\, \alpha = \frac{y_{\varpi_1} - y_{\mathcal{G}}}{x_{\varpi_1} - x_{\mathcal{G}}} = \frac{5^m698 - 5^m473}{11^m070 - 9^m335} = 0.130$$

§ 2. — *MOMENTS D'INERTIE DES φ*

PAR RAPPORT A L'AXE VERTICAL $\mathcal{G}$Y ET A SON CONJUGUÉ $\mathcal{G}$X'.

LONGUEURS SUIVANT $\mathcal{G}$Y ET $\mathcal{G}$X'

DES DIAMÈTRES DE L'ELLIPSE ÉLASTIQUE

Art. 1. — Moment d'inertie des φ par rapport à la verticale YY du centre élastique.

A. — Construction graphique. Funiculaire 3.

Déterminons les antipôles π^Y (ξ^Y, η^Y) de YY par rapport aux ellipses centrales des tranches.

Suspendons-y verticalement les longueurs

$$\gamma_1 = \frac{\varphi_1 x_1}{p'}, \quad \gamma_2 = \frac{\varphi_2 x_2}{p'}, \quad \ldots\ldots$$

interceptées sur YY par les côtés prolongés du funiculaire **1** (p. 133 Art4-A).

Construisons le polygone des forces de pôle O''' placé sur le dernier côté de **1**, de distance polaire p''' (on a pris $p''' = \frac{\mathcal{L}}{8} = 2^m1625 = \frac{\Sigma\varphi}{8}$ (p. 133 Art 4-A) puis le funiculaire **3**.

3 est en S : ses côtés extrêmes sont parallèles.

Soient $\lambda_1, \lambda_2 \ldots\ldots$ les longueurs interceptées sur l'axe YY par les côtés prolongés de **3** :

$$\lambda_1 = \frac{\gamma_1 \xi_1}{p'''} = \frac{\varphi_1 x_1 \xi_1}{p' p'''}, \qquad \lambda_2 = \frac{\varphi_2 x_2 \xi_2}{p' p'''}, \quad \ldots\ldots$$

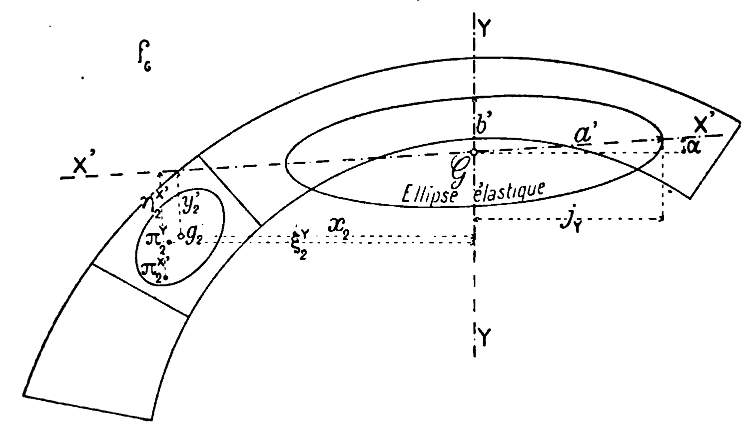
$\varphi_1 x_1 \xi_1$ produit du poids élastique φ_1 par x_1, distance du centre de gravité à l'axe YY et par ξ_1, distance au même axe de son antipôle, est le moment d'inertie de φ_1 par rapport à YY.

La somme $\lambda_1 + \lambda_2 + \ldots\ldots = \overset{B}{\underset{A}{\Lambda}}$, est donc, divisé par $p'p'''$, le moment d'inertie I_{Y^2} des poids élastiques de tout l'arc par rapport à YY

$$I_{Y^2} = \overset{B}{\underset{A}{\Lambda}}\, p'p'''.$$

B. — Vérification par le calcul.

TABLEAU III. — *Calcul de* I_{Y^2} *et de* $\overset{B}{\underset{A}{\Lambda}}$, *distance verticale entre les côtés extrêmes du funiculaire* **3** (f_6).



N°s des tranches	Poids élastiques (Tableau I col 7) φ	Distance horizontale à YY mesurée sur l'épure à l'échelle de 0m05 par m. — des centres de gravité g x	des anti-pôles π^Y ξ^Y	Produits $\varphi x \xi^Y$
1	2	3	4	5
1	1.541	9m32	9m37	134.573
2	2.759	8.36	8.40	193.748
3	5.349	7.00	7.05	263.973
4	10.589	5.20	5.30	291.833
5	19.604	3.01	3.18	187.646
6	30.199	0.41	1.96	24.268
7	26.329	2.24	2.48	146.263
8	17.019	4.64	4.72	372.730
9	9.403	6.72	6.77	427.784
$\sum_A^B \varphi =$	122.792	$I_{Y^2} = \sum_A^B \varphi x \xi^Y =$		2042.818

sur l'épure : $p' = \mathcal{L} = 17^m30$

$p''' = 2^m1625$

$$\overset{B}{\underset{A}{\Lambda}}\left(\begin{smallmatrix}\text{mesuré}\\ \text{sur}\\ \text{l'épure}\end{smallmatrix}\right) = \frac{2042.818 \text{ (col. 5)}}{17.3 \times 2.1625} \times 0.141 \; (\varphi = 1 \text{ p. } 133)$$

$$= 7^m70$$

La construction graphique est exacte.

Art. 2. — Moment d'inertie des φ par rapport à X'X'.

Les y sont arrêtés à X'X' (f_6). $I_{X'^2} = \Sigma\varphi y'^2$.

Disposons les poids élastiques φ sur une parallèle à X'X'.

*A. — Construction graphique. Funiculaire **4**.*

Construisons un polygone des forces de pôle O'', de distance polaire $p'' = \frac{\mathcal{L}}{6}$, comptée verticalement, puis le funiculaire **2**.

Ses côtés prolongés découpent sur X'X' des longueurs

$$\nu_1 = \frac{\varphi_1 y'_1}{p''}, \qquad \nu_2 = \frac{\varphi_2 y'_2}{p''} \quad \ldots\ldots$$

Déterminons les antipôles $\pi^{X'}$ ($\xi'^{X'}$, $\eta'^{X'}$) de X'X' par rapport aux ellipses centrales des tranches.

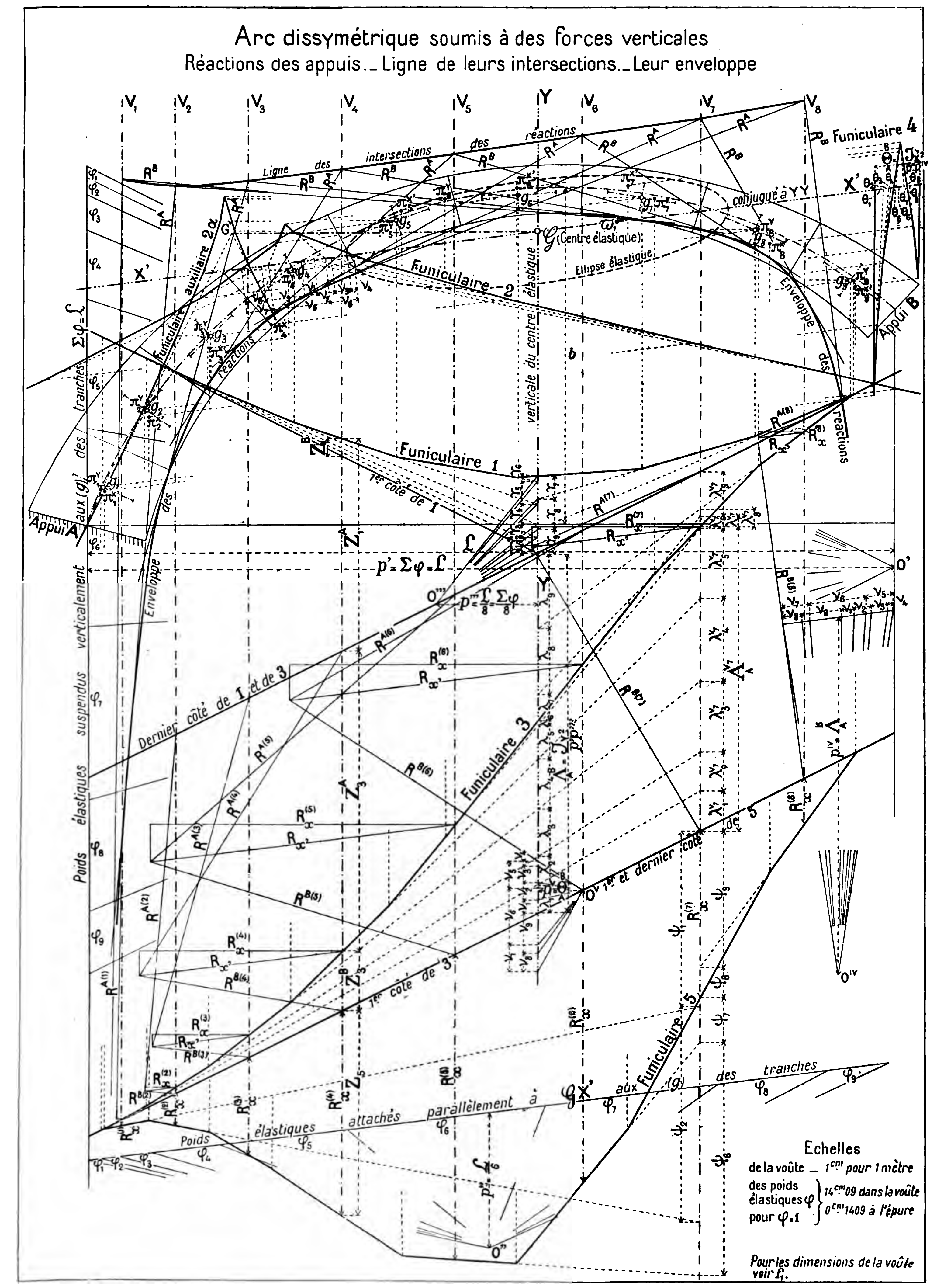
Attachons-y parallèlement à X'X' les longueurs $\nu_1 \nu_2 \ldots.$

Construisons le polygone des forces O^{IV}, de distance polaire p^{IV} (comptée verticalement), puis le funiculaire **4**.

Les côtés extrêmes de **4** sont parallèles.

Soient $\theta_1, \theta_2, \ldots.$ les segments découpés sur X'X', par les côtés prolongés de **4**.

$$\theta_1 = \frac{\nu_1 \eta'_1}{p^{IV}} = \frac{\varphi_1 y'_1 \eta'_1}{p'' p^{IV}}, \qquad \theta_2 = \frac{\varphi_2 y'_2 \eta'_2}{p'' p^{IV}}, \ldots.$$


Arc dissymétrique soumis à des forces verticales
Réactions des appuis.– Ligne de leurs intersections.– Leur enveloppe
Ligne des intersections des réactions
Funiculaire 4
conjugué à YY
Centre élastique
Ellipse élastique
Funiculaire 2
auxiliaire 2α
Funiculaire
réactions
Enveloppe des réactions
Appui B
Appui A
verticale du centre élastique
Funiculaire 1
1er côté de 1
Poids élastiques suspendus verticalement aux (g) des tranches
Enveloppe des
Dernier côté de 1 et de 3
Funiculaire 3
1er et dernier côté de 5
1er côté de 3
Funiculaire 5
Poids élastiques attachés parallèlement à 𝒢X' aux (g) des tranches
Echelles
de la voûte – 1cm pour 1 mètre
des poids élastiques φ pour φ=1 – 14cm09 dans la voûte, 0cm1409 à l'épure
Pour les dimensions de la voûte voir f1.

$\varphi_1 y'_1 \eta'_1$ est le moment d'inertie de φ_1 par rapport à X'X'.

La somme $\theta_1 + \theta_2 + \ldots . = \overset{B}{\underset{A}{\Theta}}$ est donc, divisé par $p'' p^{IV}$, le moment d'inertie $I_{X''}$ des poids élastiques de tout l'arc par rapport à X'X'.

$$I_{X''} = \overset{B}{\underset{A}{\Theta}}\, p'' p^{IV}$$

TABLEAU IV. — *Calcul de* $I_{X''}$ *et de* $\overset{B}{\underset{A}{\Theta}}$ *distance, suivant* X'X', *entre les côtés extrêmes du funiculaire* **4** (f_4).

B. — Vérification par le calcul.

Nos des tranches	Poids élastiques (Tableau I col. 7)	Distance verticale à X'X' mesurée sur l'épure à l'échelle de 0m05 par m.		Produits
		des centres de gravité g	des anti-pôles $\pi^{x'}$	
	φ	y'	$\eta'^{x'}$	$\varphi y' \eta'^{x'}$
1	2	3	4	5
1	1.541	4m30	4m40	29.155
2	2.759	2.78	2.90	22.333
3	5.349	1.38	1.58	11.663
4	10.589	0.19	1.28	2.575
5	19.604	0.60	0.82	9.645
6	30.199	0.84	0.95	24.099
7	26.329	0.45	0.74	8.768
8	17.019	0.48	0.90	7.352
9	9.403	1.83	2.00	34.414
$\sum_A^B \varphi =$ 122.792		$I_{X''} = \sum_A^B \varphi y' \eta'^{x'} =$ 150.004		

sur l'épure $p'' = 2^m883$
$p^{IV} = 7^m700$

$$\overset{B}{\underset{A}{\Theta}}\left(\begin{array}{c}\text{mesuré}\\ \text{sur}\\ \text{l'épure}\end{array}\right) = \frac{150.004\,(\text{col.}5)}{2.883 \times 7.700} \times 0.141 \quad (\varphi = 1 \text{ p. } 133)$$

$$= 0^m953$$

La construction graphique est exacte.

En pratique on ne trace pas l'ellipse élastique ; si, pour plus de clarté on la veut tracer, on a ainsi ses axes conjugués :

Art. 3. — Longueur des 2 axes conjugués de l'ellipse élastique : ***a'*** **suivant X'X',** ***b'*** **suivant YY.**

$$I_{Y'} = \overset{B}{\underset{A}{\Lambda}} \text{ (funiculaire } \mathbf{3}) \, p' p''' = j_Y^2 \sum_A^B \varphi = a'^2 \cos^2 \alpha \sum_A^B \varphi \qquad a' = 4^m112$$

$$I_{X''} = \overset{B}{\underset{A}{\Theta}} \text{ (funiculaire } \mathbf{4}) \, p'' p^{IV} = b'^2 \sum_A^B \varphi \qquad b' = 1^m105$$

§ 3. — *MOMENTS CENTRIFUGES DES φ PAR RAPPORT : D'UNE PART A UN AXE ($\mathcal{G}$Y, OU $\mathcal{G}$X') D'AUTRE PART A UNE FORCE VERTICALE.*

Art. 1. — Par rapport à YY et à une autre verticale (par exemple V_7).

Prolongeons jusqu'à V_7 les côtés de **3**.

Soient $\lambda_1^{V_7}$, $\lambda_2^{V_7}$, ... les segments interceptés

$$\lambda_1^{V_7} = \frac{\varphi_1 \xi_1 \, \mathcal{D}^{ce}(g_1 V_7)}{p' p'''}, \qquad \lambda_2^{V_7} = \frac{\varphi_2 \xi_2 \, \mathcal{D}^{ce}(g_2 V_7)}{p' p'''}, \ldots .$$

Ce sont, divisés par $p' p'''$, les moments centrifuges des φ par rapport à $\mathcal{G}$Y et à V_7.

La somme $\lambda_1^{V_7} + \lambda_2^{V_7} + \ldots . = \overset{V_7}{\underset{A}{\Lambda}}$ est, divisée par $p' p'''$, la somme des moments centrifuges, par rapport à YY et V_7, des φ de A à V_7.

Art. 2. — Par rapport à X'X' et à la verticale V_7. Funiculaire 5.

Appliquons verticalement aux antipôles $\pi_1^{X'}$.... de X'X' les moments $\nu_1 = \frac{\varphi_1 y'_1}{p''}$, $\nu_2 = \frac{\varphi_2 y'_2}{p''}$,.... (funiculaire **2**).

Plaçons les ν sur YY à partir du premier côté de **3** ; plaçons sur ce côté un pôle O^V, et construisons un polygone des forces de distance polaire p^V, puis le funiculaire **5**.

Les côtés prolongés de **5** interceptent sur V_7 les segments

$$\psi_1 = \nu_1 \frac{\mathcal{D}^{ce}(\pi_1^{X'} V_7)}{p^V} = \frac{\varphi_1 y'_1 \mathcal{D}^{ce}(\pi_1^{X'} V_7)}{p'' p^V}, \qquad \psi_2 = \frac{\varphi_2 y'_2 \mathcal{D}^{ce}(\pi_2^{X'} V_7)}{p'' p^V}, \ldots.$$ [2]

Ce sont, divisés par $p''p^V$, les moments centrifuges des φ par rapport à X'X' et à la verticale V_7.

CHAPITRE II

COMMENT A L'AIDE DES FUNICULAIRES 1 A 5 ON CONSTRUIT LES RÉACTIONS DES APPUIS DUES A DES FORCES VERTICALES

§. 1. — *DANS LES FORMULES* p. 131 *REMPLACER LES MOMENTS PAR DES LONGUEURS PRISES SUR LES FUNICULAIRES* 1, 3, 5.

Art. 1. — Formules générales.

1° Réaction de l'appui de droite R^B.

$$\frac{R_y^B}{V} = \frac{\overset{V}{\underset{A}{I}}_{VY}}{\overset{B}{\underset{A}{I}}_{Y^2}} = \frac{\overset{V}{\underset{A}{\Lambda}} p' p'''}{\overset{B}{\underset{A}{\Lambda}} p' p'''} = \frac{\overset{V}{\underset{A}{\Lambda}}}{\overset{B}{\underset{A}{\Lambda}}}$$

$$\frac{R_x^B}{V} = \frac{\overset{V}{\underset{A}{I}}_{VX'}}{\overset{B}{\underset{A}{I}}_{X'^2}} = \frac{\overset{V}{\underset{A}{\Psi}} p'' p^V}{\overset{B}{\underset{A}{\Theta}} p'' p^{IV}} = \frac{\overset{V}{\underset{A}{\Psi}} p^V}{\overset{B}{\underset{A}{\Theta}} p^{IV}}$$

$$\frac{R_y}{R_x} = \frac{\overset{V}{\underset{A}{\Lambda}}}{\overset{B}{\underset{A}{\Lambda}}} \, \frac{\overset{B}{\underset{A}{\Theta}}}{\overset{V}{\underset{A}{\Psi}}} \, \frac{p^{IV}}{p^V}$$

$$\frac{R^B r_B}{V} = \frac{\overset{V}{\underset{A}{\mathfrak{M}}}(V)}{\overset{B}{\underset{A}{\Sigma}}\varphi} = \frac{\overset{V}{\underset{A}{\Gamma}} p'}{\overset{B}{\underset{A}{\Sigma}}\varphi}$$

$$m \cos\theta = \frac{R^B r_B}{R_y^B} \qquad n = \frac{R^B r_B}{R_x^B}$$

2° Réaction de l'appui de gauche R^A.

Pour R^B, on a mesuré les ordonnées entre les funiculaires **1, 3, 5** et leur 1er côté (côté extrême de gauche) prolongé ; pour R^A, on les mesurera entre les polygones et leur dernier côté (côté extrême de droite).

2. — ψ_3, ψ_4 et ψ_5 sont en dehors de l'épure Pl. I.

On adoptera $p' = \overset{B}{\underset{A}{\Sigma}} \varphi$. [3]

Art. 2. — Choix de distances polaires pour simplifier formules et constructions.

Avec M. Guidi,[4] j'ai pris $p^{IV} = \overset{B}{\underset{A}{\Lambda}}$, $p^{V} = \overset{B}{\underset{A}{\Theta}}$; p'' et p''' qui disparaissent des formules peuvent être prises arbitrairement.[5]

Réactions de l'appui.

		de droite R^B	de gauche R^A
Moment	$\frac{Rr}{V} =$	$\overset{V}{\underset{A}{\Gamma}} = Z_1^B$ (Ordonnée entre le funiculaire 1 et son 1er côté (gauche).	$\overset{B}{\underset{V}{\Gamma}} = Z_1^A$ (Ordonnée entre le funiculaire 1 et son dernier côté (droite).
Composante verticale	$\frac{R_y}{V} =$	$\frac{1}{\overset{B}{\underset{A}{\Lambda}}} \overset{V}{\underset{A}{\Lambda}} = \frac{1}{\overset{B}{\underset{A}{\Lambda}}} Z_3^B$ (Ordonnée entre le funiculaire 3 et son 1er côté.	$\frac{1}{\overset{B}{\underset{A}{\Lambda}}} \overset{B}{\underset{V}{\Lambda}} = \frac{1}{\overset{B}{\underset{A}{\Lambda}}} Z_3^A$ (Ordonnée entre le funiculaire 3 et son dernier côté.
Composante horizontale	$\frac{R_x}{V} =$	$\frac{1}{\overset{B}{\underset{A}{\Lambda}}} \overset{V}{\underset{A}{\Psi}} \left(= \overset{B}{\underset{V}{\Psi}}\right) = \frac{1}{\overset{B}{\underset{A}{\Lambda}}} Z_5$ (Ordonnée entre le funiculaire 5 et ses côtés extrêmes, qui se confondent.	
Distances à $\mathcal{G}$ (Coordonnées à l'origine)	suivant $\mathcal{G}$X $m \cos \theta =$	$\overset{B}{\underset{A}{\Lambda}} \frac{Z_1^B}{Z_3^B}$	$\overset{B}{\underset{A}{\Lambda}} \frac{Z_1^A}{Z_3^A}$
	suivant $\mathcal{G}$Y $n =$	$\overset{B}{\underset{A}{\Lambda}} \frac{Z_1^B}{Z_5}$	$\overset{B}{\underset{A}{\Lambda}} \frac{Z_1^A}{Z_5}$

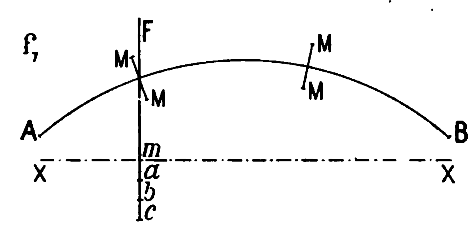
Ainsi les funiculaires **1, 3, 5,** sont des lignes d'influence[6] : **1** du moment Rr par rapport au centre élastique, **3** de la composante verticale, **5** de la composante horizontale de la réaction de chaque appui due à une force verticale V.

3. — A l'épure (Pl. I), l'échelle des φ est telle que $\overset{B}{\underset{A}{\Sigma}} \varphi = \mathcal{L}$ (portée de la fibre moyenne).

4. — *L'Arco elastico senza cerniere* — Académie des Sciences de Turin, 1902.

5. — A la Pl. I ; $p'' = \frac{\overset{B}{\underset{A}{\Sigma}} \varphi}{6} = \frac{\mathcal{L}}{6}$ $\quad p''' = \frac{\overset{B}{\underset{A}{\Sigma}} \varphi}{8} = \frac{\mathcal{L}}{8}$

6. — J'en rappelle la définition.
Sur un arc A B agissent des charges fixes (poids mort), des charges roulantes.....
Considérons l'une d'elles F (f_1).



Sur une section M M, elle produit : un moment de flexion, — une poussée horizontale, — un certain effort par $\overline{0^m01}^2$ à l'intrados, à l'extrados, — un déplacement du centre de gravité.....

Représentons sur la ligne d'action de F chacune de ces quantités par des longueurs comptées à partir d'un axe XX : *ma, mb, mc.*

Puis faisons avancer la charge F d'un appui à l'autre, par exemple de A à B.

Les lieux des points *a, b, c..* . sont les « lignes d'influence » du moment, de la poussée horizontale, du travail par $\overline{0^m01}^2$, du déplacement vertical du centre de gravité..... relatifs à la section M M.

Chaque section a ses lignes d'influence.

Supposons qu'on les ait tracées pour la force 1 : pour une force de N^{Tonnes}, toutes les ordonnées seront multipliées par N ; pour une section, une même ligne d'influence servira pour chaque charge et chaque surcharge.

Si plusieurs charges ou plusieurs surcharges agissent ensemble, on ajoute leurs ordonnées.

Art. 3. — Comment on construit les réactions R^B, R^A.

On a successivement (Pl. I), par **5**, R_x puis $R_{x'}$; par **3**, R^B_y, puis R^B ; R^A_y, puis R^A.

Pour avoir la ligne d'action de R^B, on détermine sa distance à $\mathcal{G}$.

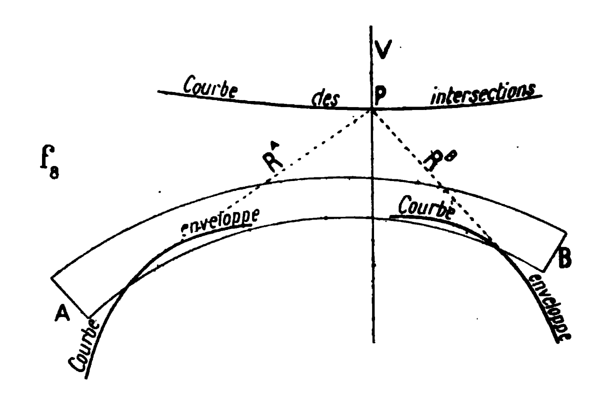
$$\mathfrak{M} = R^B r_B \qquad \text{d'où } r_B$$

Autour de $\mathcal{G}$, décrivons un arc de rayon r_B et menons une tangente parallèle à R^B.

R^A en place passe par le point de rencontre de V et de R^B et est parallèle à R^A qu'on a construite. Comme vérification, on place R^A.

Pour une charge V près d'un appui, les réactions sont assez mal déterminées ; une erreur sur elles change peu les efforts ; si cependant on les voulait exactes, on déterminerait l'antipôle ϖ de V pour l'ellipse élastique entre l'autre appui et V, puis l'antipolaire de ϖ par rapport à l'ellipse élastique totale.

§ 2. — *COURBE DES INTERSECTIONS ET COURBE ENVELOPPE DES RÉACTIONS*



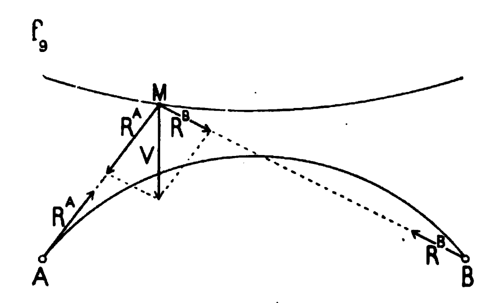
Les deux réactions R^A, R^B d'une force $V = 1$ se coupent en un point P de la ligne d'action de V (f_8).

Déplaçons V de A à B et traçons pour chaque position de V ses deux réactions. On obtient deux courbes; celle des intersections des réactions et leur enveloppe.[7]

Par elles, on a immédiatement les réactions dues à une force verticale quelconque V (f_8).

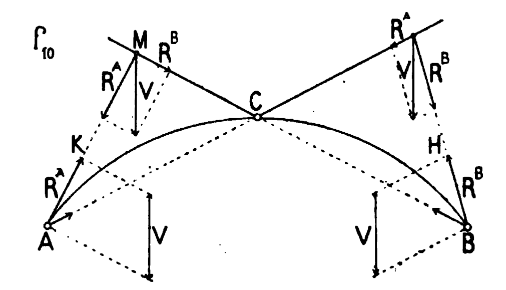
Du point de rencontre P de V, avec la courbe des intersections, on mène les deux tangentes à la courbe enveloppe.[8]

7. — Ces deux courbes ont été indiquées par E. Winkler, Professeur à l'Ecole Polytechnique de Prague « *Die Lehre von der Elasticität und Festigkeit* ». Prague 1867, p. 328 et suivantes.



8. — S'il y a aux reins deux articulations A, B (f_9), les deux réactions d'une charge V passent par A et B; l'enveloppe de R^A, R^B est réduite aux points A et B.

S'il y a trois articulations A, B, C, (f_{10}), l'enveloppe de R^A, R^B demeure réduite aux points A et B ; la ligne des intersections est : à droite de C, AC prolongée — à gauche de C, BC prolongée.



Pour un même V, le lieu du point K extrémité des réactions R^A, est une parallèle à BC, à V au-dessus de celle menée par A — de même, le lieu de H est une parallèle à AC, à V au-dessus de celle menée par B.

Ces courbes tracées avec $V = 1$ ne dépendent pas de l'intensité de V, mais seulement des propriétés élastiques de l'arc.

On n'en a pas besoin pour tracer les lignes d'influence, mais elles sont fort utiles, et comme contrôle, et parce qu'elles permettent de trouver de suite les réactions dues à une charge, de délimiter les zônes à efforts > 0, < 0, ...

CHAPITRE III

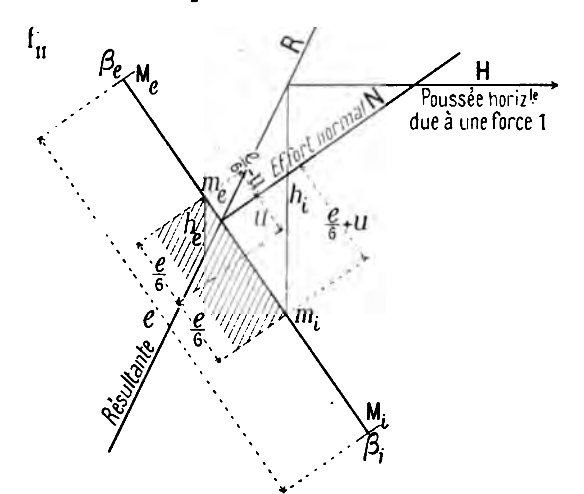
CALCUL, A L'AIDE DES LIGNES D'INFLUENCE, DES EFFORTS EN KG $/\overline{0^m 01}^2$ A L'INTRADOS β_i ET A L'EXTRADOS β_e, D'UNE SECTION QUELCONQUE MM, SOUS L'ACTION D'UNE FORCE 1.

Art. 1. — Expression de β_i et β_e en fonction de la poussée horizontale H et des distances verticales h_e, h_i de m_e, m_i, limites du noyau central, à la résultante R des actions sur MM. (f₁₁)

$$\left\{\begin{aligned} \beta_i &= \frac{N}{el}\left(1 - \frac{6u}{e}\right) = \frac{N}{\frac{1}{6}e^2 l}\left(\frac{e}{6} - u\right) \\ \beta_e &= \frac{N}{el}\left(1 + \frac{6u}{e}\right) = \frac{N}{\frac{1}{6}e^2 l}\left(\frac{e}{6} + u\right) \end{aligned}\right.$$

$$\left\{\begin{aligned} \mathfrak{M}_e\left(\begin{smallmatrix}\text{moment de R}\\ \text{par rapport à } m_e\end{smallmatrix}\right) &= N\left(\frac{e}{6} - u\right) = H\left(\begin{smallmatrix}\text{poussée}\\ \text{horizontale}\end{smallmatrix}\right) h_e \\ \mathfrak{M}_i\left(\begin{smallmatrix}\text{moment de R}\\ \text{par rapport à } m_i\end{smallmatrix}\right) &= N\left(\frac{e}{6} + u\right) = H\, h_i \end{aligned}\right.$$

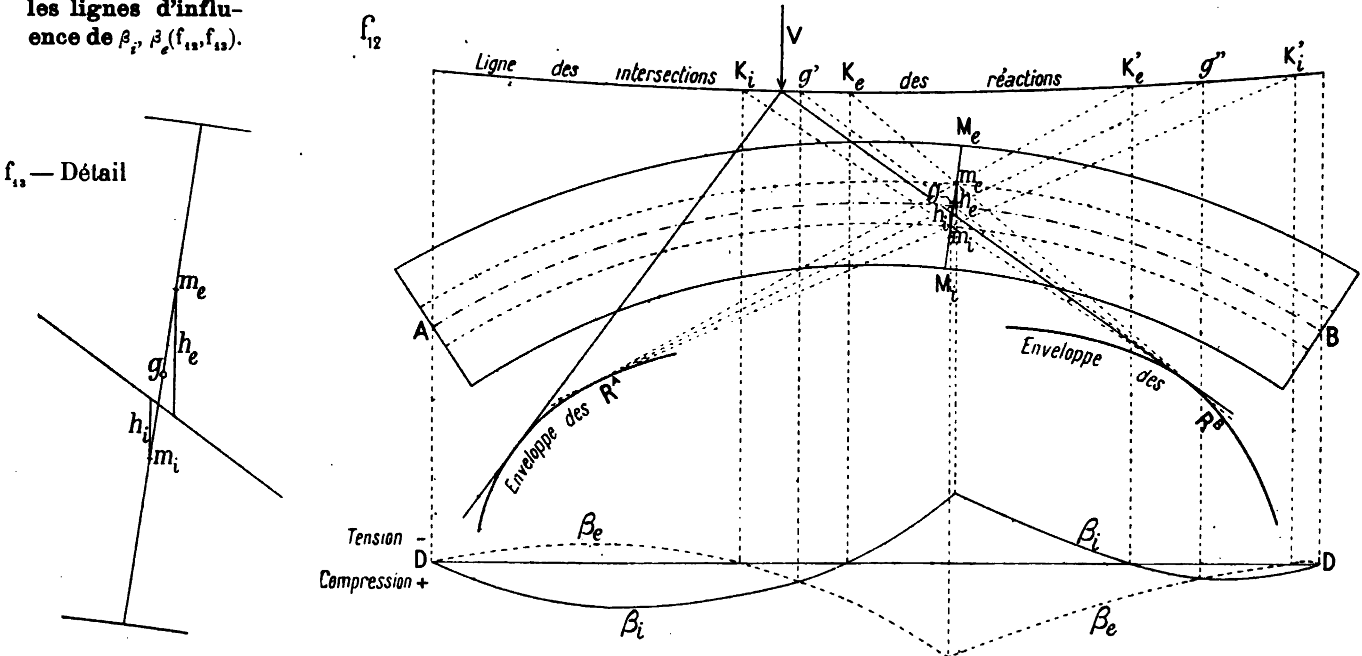
D'où $\beta_e = \frac{H h_i}{\frac{1}{6}e^2 l}$ $\qquad \beta_i = \frac{H h_e}{\frac{1}{6}e^2 l}$



H est la poussée horizontale due à une charge verticale 1 ; β_e, β_i sont les efforts pour une charge 1

Art. 2. — Comment, pour une section MM, on construit les lignes d'influence de β_i, β_e (f.12, f.13).

Comme pour une section donnée, $\frac{1}{6}e^2 l$ est constant, les lignes d'influence de β_i et β_e sont, à l'échelle près, celles des moments $H h_e$, $H h_i$.



f13 — Détail

On a déjà construit la ligne d'influence de la poussée horizontale H ; c'est le funiculaire **5**. On mesure h_i, h_e sur l'épure.

On fait les produits $H h_e$, $H h_i$; on les divise par $\frac{1}{6}e^2 l$.

Le calcul détaillé est donné plus loin pour l'arc symétrique.

Art. 3. — Vérification des points des lignes d'influence sur leur horizontale de base (f.12).

Par m_e, bord supérieur du noyau central de la section MM, menons une tangente à l'enveloppe des R^B et des R^A ; elle coupe en K_e, K'_e la courbe de leurs intersections. La force verticale suspendue à K_e, K'_e produira en M_i un effort $\beta_i = 0$ ($h_e = 0$).

Donc la ligne d'influence des β_i coupe son horizontale de base DD sur la verticale de K_e, de K'_e.

De même la ligne d'infiuence des β_e coupe DD sur la verticale de K_i, de K'_i.

Art. 4. — Zônes dans lesquelles les forces produisent des efforts >0 ou <0 (f.12).

Une force entre K_e et K'_e a un $h_e < 0$; elle produira donc en M_i un effort β_i négatif : elle diminue le travail à l'intrados.

Une force à gauche de K_i, à droite de K'_i a aussi un $h_i < 0$; elle produira en M_e un effort $\beta_e < 0$: elle diminue le travail à l'extrados.

Une force entre K_i K_e, K'_i K'_e produira en M_i et M_e un effort >0 ; toute la section est comprimée[9].

Menons par le milieu g de $M_e M_i$ des tangentes aux enveloppes. Elles coupent en g', g'' la ligne des intersections.

Les lignes d'influence de β_i, β_e se coupent sur les verticales de g', g''.

9. — Cette méthode de déterminer la charge la plus défavorable est due à Winkler « *Die Lehre von der Elasticität und Festigkeit* ». Prague 1867, p. 295 et 330.

CHAPITRE IV

CALCUL DES EFFORTS PAR $\overline{0^m01}^2$

DUS — NON PLUS A UNE FORCE 1 — MAIS AUX FORCES

(POIDS, SURCHARGES)

AGISSANT RÉELLEMENT SUR L'ARC.

§ 1. — *PAR LES LIGNES D'INFLUENCE DES* β_i, β_e (f_{11})

Chaque poids mort P, chaque surcharge V produit un effort réel β égal à l'ordonnée de la ligne d'influence, multipliée par P, par V.

Pour chaque section, on fera, une fois pour toutes, la somme des efforts dus aux poids P; puis on calculera ceux dus aux surcharges pour différentes positions du train d'épreuve; on en déterminera par tâtonnements la somme maxima.

(Voir plus loin au titre IV le calcul pour un arc symétrique).

§ 2. — *PAR LES COURBES DE PRESSION*

Par un polygone des forces, on compose ensemble toutes les réactions R^A, toutes les réactions R^B. Soient $\mathcal{R}^A$, $\mathcal{R}^B$ les résultantes : on les met en place par un funiculaire.

Puis on construit un funiculaire des poids et surcharges dont le premier côté est $\mathcal{R}^A$ et dont le dernier sera $\mathcal{R}^B$. C'est la courbe des pressions.

On a les efforts β_i, β_e dans une section par les formules usuelles :

$$\beta_i = \frac{N}{el}\left(1 - \frac{6u}{e}\right) \qquad \beta_e = \frac{N}{el}\left(1 + \frac{6u}{e}\right) \qquad (f_{11})$$

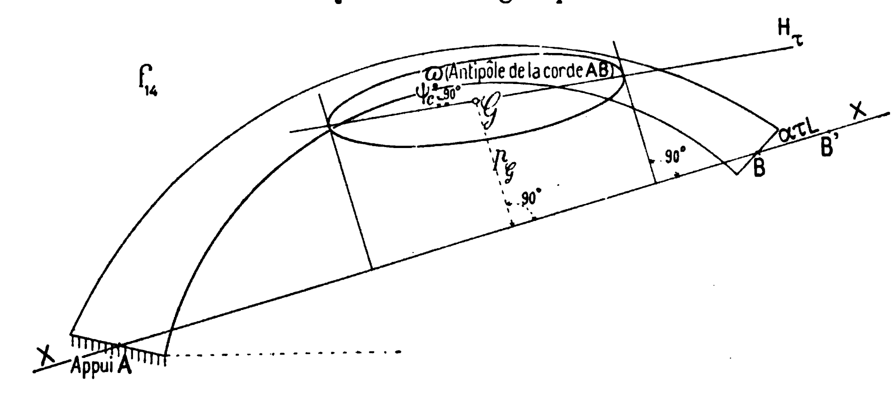
On a N par le polygone des forces agissant sur la voûte, u par la courbe des pressions.

En pratique, c'est par les lignes d'influence qu'on détermine les efforts : on ne construit guère de courbes de pression que pour les poids morts.

CHAPITRE V

RÉACTION H_τ DUE A UNE VARIATION DE TEMPÉRATURE τ

Supposons encore l'appui A fixe, l'appui B libre. Sous l'action d'une variation de température τ, une dimension l se dilate ou se contracte de $l\alpha\tau$. Les angles des joints avec la fibre moyenne ne changent pas.



B s'avance suivant la corde A B = L de B B' $=\alpha\tau L$: c'est une rotation autour d'un point π à l'infini sur une normale à la corde.

La réaction H_τ, pour ramener l'appui B à sa place, doit produire une translation égale et opposée. Ce sera l'antipolaire de π par rapport à l'ellipse totale ; elle passe par $\mathcal{G}$, puisque son antipôle est à l'infini et elle est conjuguée aux normales à la corde AB.

Déplacement $=\alpha\tau L = H_\tau \times$ moment centrifuge des φ par rapport à H_τ et à la corde AB.
$= H_\tau \times \sum_A^B \varphi \times p_{\mathcal{G}}$ (distance à la corde AB du centre élastique $\mathcal{G}$) $\times\ \psi_c$ (distance à la réaction H_τ de l'antipôle ϖ de la corde AB).

φ est $\frac{L}{EI}$ $\left(\text{et non } \frac{L}{I}\right)$.

$$H_\tau = \frac{E\alpha\tau L}{\sum_A^B \varphi\, p_{\mathcal{G}}\, \psi_c}$$

Si la température s'abaisse, $\dot{H}$ est négatif.

TITRE IV

ARC SYMÉTRIQUE

EFFORTS DANS LA VOÛTE DU PONT ANTOINETTE [1, 2]

CHAPITRE I

CARACTÉRISTIQUES ÉLASTIQUES DE L'ARC
COURBE DES INTERSECTIONS
ET COURBE ENVELOPPE DES RÉACTIONS

§ 1. — *DIMENSIONS DE LA VOÛTE*

Intrados arc de 31^m de rayon	Portée	47^{m}396	Epaisseur	à la clef	1^{m}50
	Montée	11^{m}015		aux retombées	2^{m}283
Fibre moyenne	Portée $2a' =$	49^{m}142	Fruit des têtes		0.04
	Montée $b' =$	11^{m}029	Largeur du pont au niveau des rails		4^{m}74

§ 2. — *CENTRE ÉLASTIQUE*

Art. 1. — Division de l'arc en 18 tranches.

On divise chaque demi-voûte en 9 tranches de 3^{m}08 de longueur comptée suivant la fibre moyenne.

Art. 2. — Axes des ellipses centrales des tranches. Leurs poids élastiques.

$a\left(\frac{1}{2}\text{ grand axe des ellipses centrales des tranches}\right) = 0.289 \times 3^m08 = 0^m890$ (p. 132).

Dans le calcul des moments d'inertie des sections transversales, on a admis comme largeur de la voûte, le rapport de la largeur réelle à 4^{m}74, largeur au niveau du rail.

TABLEAU I. — *Petit axe de l'ellipse centrale des tranches — Leurs poids élastiques.*

N^{os} des tranches à partir de la clef	Dimensions de la voûte au droit des centres de gravité g des tranches		Demi petit axe de l'ellipse centrale de la tranche	Moment d'inertie de la section transversale	Poids élastique de la tranche
	Epaisseur e	Largeur l	$b = 0\ 289\ e$	$I = \frac{1}{12}\left(\frac{l}{4.74}\right)e^3$	$\varphi = \frac{L = 3^m08}{I}$
1	2	3	4	5	6
1 (clef)	1^{m}51	4^{m}88	0^{m}436	0.295386	10.4270
2	1.53	4.90	0.442	0.308540	9.9825
3	1.57	4.95	0.454	0.336779	9.1455
4	1.63	5.02	0.471	0.382215	8.0583
5	1.70	5.11	0.491	0.441376	6.9782
6	1.80	5.28	0.520	0.536240	5.7437
7	1.92	5.35	0.555	0.665729	4.6265
8	2.05	5.50	0.592	0.833038	3.6973
9 (retomb.)	2.20	5.68	0.635	1.063302	2.8967
					$\Sigma\varphi$ (1/2 voûte) = 61.5557

1. — Tome II, p. 145.

2. — Je n'ai fait que résumer l'excellent mémoire de M. le Professeur Guidi : « *l'arco elastico senza cerniere* » Académie des Sciences de Turin, Novembre 1902.

Art. 3. — Centre élastique $\mathcal{G}$ de l'arc.

A. — Construction graphique. Funiculaires **1** *et* **2** *Pl. II.*

$\mathcal{G}$ est sur la verticale YY, axe de symétrie, axe de l'ellipse élastique.

Le funiculaire **1** des φ suspendus verticalement aux g (p. 133) est symétrique par rapport à YY ; ses côtés extrêmes se coupent sur YY ; il est horizontal à la clef.

Attachons les φ horizontalement aux g ; traçons un funiculaire **2** : $\mathcal{G}$ est sur l'horizontale XX passant par le point de rencontre sur YY de ses côtés extrêmes ; XX est l'autre axe de l'ellipse élastique.

Dans l'épure Pl. II, on a pris :

p' (distance polaire de **1**) $= 2a'$ (portée de la fibre moyenne) $= 49^m142$.

$$= \Sigma\varphi \left(\begin{array}{l} \text{voûte entière, 18 tranches, } 2 \times 61.5557 \text{ : c'est-à-dire que} \\ \varphi = 1 \text{ est représenté par } \dfrac{49^m142}{2 \times 61.5557} = 0^m3992. \end{array} \right)$$

Le pôle O' est en dehors de l'épure ; pour tracer les rayons du polygone P', on a joint les divisions de l'échelle des φ à celles d'une échelle des $\frac{\varphi}{2}$ sur YY.

p'' (distance polaire de **2**) $= \dfrac{2a'}{6} = 8^m19.$

B. — Vérification par le calcul de la position de $\mathcal{G}$.

Tableau II. — *Position sur* YY *du centre élastique.*

Nos des tranches	Poids élastiques (Tableau I col. 6)	Par rapport à l'horizontale de g_9 : Ordonnées des g mesurées sur l'épure à 3cm p. 1m	Moments des φ	Vérification : par rapport à $\mathcal{G}$X (horizontale de $\mathcal{G}$) : Ordonnées des g	Moments des φ
	φ	y	φy	$y' = y - 7^m376$	$\varphi y'$
1	2	3	4	5	6
1 (clef)	10.4270	9^m89	103.123	2^m514	26.21
2	9.9825	9.58	95.632	2.204	22.00
3	9.1455	9.00	82.310	1.624	14.85
4	8.0583	8.15	65.675	0.774	6.24
5	6.9782	7.01	48.916	—0.366	— 2.55
6	5.7437	5.62	32.280	—1.756	—10.09
7	4.6265	3.97	18.365	—3.406	—15.76
8	3.6973	2.09	7.727	—5.286	—19.54
9 (ret.)	2.8967	0	0	—7.376	—21.36
	$\Sigma\varphi(\frac{1}{2}$ voûte$)=61.5557$		$\Sigma\varphi y = 454.028$		$\Sigma\varphi y' = 0$

$$\frac{\Sigma\varphi y}{\Sigma\varphi} = \frac{454.028}{61.5557} = 7^m376$$

$\mathcal{G}$ est à 7^m376 au-dessus de g_9 :

La construction graphique est exacte.

A l'aide des axes a et b des ellipses centrales des tranches (art. 2 précédent), on marque les antipôles π^Y et π^X de $\mathcal{G}$Y et de $\mathcal{G}$X par rapport à ces ellipses.

§. 3. — *MOMENTS D'INERTIE DES φ PAR RAPPORT A $\mathcal{G}$Y, $\mathcal{G}$X AXES DE L'ELLIPSE ÉLASTIQUE*

Art. 1. — Moments d'inertie des φ par rapport à $\mathcal{G}$Y.

A. — Construction graphique. Funiculaire **3** *Pl. II.*

On suspend verticalement les moments des φ (φx, funiculaire **1**) aux antipôles de $\mathcal{G}$Y : on construit un polygone des forces, de pôle O''', pris sur le dernier côté de **1**, de distance polaire p''', puis le funiculaire **3**.

Avec $p''' = \dfrac{2a'}{4} = 12^m2855$ $\left(\text{soit } \dfrac{\Sigma\varphi}{4}\right.$, $\Sigma\varphi$ étant représenté par $2a'$, voir plus haut Art. 3 — A$\left.\right)$, on mesure sur l'épure :

$\overset{B}{\underset{A}{\Lambda}}$ (distance verticale des côtés extrêmes de **3**) $= 12^m48$

TABLEAU III. — *Calcul de* I_{Y^2} *et de* $\overset{B}{\underset{A}{\Lambda}}$.

N°s des tranches	Poids élastiques (Tableau I col. 6)	Distance à YY mesurée sur l'épure à l'échelle de 3cm pour 1m — des centres de gravité g	des antipôles π^Y	Produits
	ρ	x	ξ_Y	$\rho x \xi_Y$
1	2	3	4	5
1 (clef)	10.4270	1m54	2m04	32.757
2	9.9825	4.61	4.78	219.972
3	9.1455	7.64	7.75	541.505
4	8.0583	10.62	10.68	913.985
5	6.9782	13.50	13.58	1279.313
6	5.7437	16.24	16.28	1518.561
7	4.6265	18.85	18.88	1646.516
8	3.6973	21.28	21.32	1677.427
9 (ret.)	2.8967	23.53	23.57	1606.516

$$\frac{1}{2} I_{Y^2} = \Sigma \rho x \xi_Y \text{ [3]} = 9436.552$$

B. — Vérification par le calcul

$$\overset{B}{\underset{A}{\Lambda}} = \frac{I_{Y^2}}{p' p'''}$$

$$= \frac{2 \times 9436{,}552 \text{ (Tableau III, col. 5)}}{49^{m}142 \times 12^{m}2855}$$

$\times\ 0^{m}3992$ ($\rho = 1$ p. 146 Art. 3—A) $= 12^{m}479$

La construction graphique est exacte.

Art. 2. — Moments d'inertie des ρ par rapport à $\mathcal{G}$X.

A. — Construction graphique. Funiculaire **4** *Pl. II.*

On attache horizontalement les moments des ρ (ρy, funiculaire **2**) aux antipôles de $\mathcal{G}$X. On construit un polygone des forces O^{IV} de distance polaire $p^{IV} = \overset{B}{\underset{A}{\Lambda}} = 12^{m}48$, puis le funiculaire **4**.

On mesure sur l'épure :

$\overset{B}{\underset{A}{\Theta}}$ (distance horizontale des côtés extrêmes de **4** qui sont verticaux) $= 3^{m}86$

B. — Vérification par le calcul.

TABLEAU IV. — *Calcul de* I_{X^2} *et de* $\overset{B}{\underset{A}{\Theta}}$.

N°s des tranches	Poids élastiques (Tableau I col. 6)	Distance à XX mesurée sur l'épure à l'échelle de 3cm pour 1m — des centres de gravité g	des antipôles π^X	Produits
	ρ	y	η_X	$\rho y \eta_X$
1	2	3	4	5
1 (clef)	10.4270	2m51	2m57	67.261
2	9.9825	2.20	2.30	50.511
3	9.1455	1.62	1.77	26.224
4	8.0583	0.77	1.13	7.012
5	6.9782	0.37	1.23	3.176
6	5.7437	1.76	1.97	19.915
7	4.6265	3.41	3.52	55.532
8	3.6973	5.29	5.37	105.030
9 (ret.)	2.8967	7.38	7.46	159.477

$$\frac{1}{2} I_{X^2} = \Sigma \rho y \eta_X \text{ [3]} = 494.138$$

$$\overset{B}{\underset{A}{\Theta}} = \frac{I_{X^2}}{p'' p^{IV}}$$

$$= \frac{2 \times 494.138 \text{ (Tableau IV, col. 5)}}{8^{m}19 \times 12^{m}48}$$

$\times\ 0^{m}3992$ ($\rho = 1$ p. 146 Art. 3-A) $= 3^{m}860$

La construction graphique est exacte.

Art. 3. — Demi-axes a'', b'' de l'ellipse élastique de l'arc.

$I_{Y^2} = a''^2\ \Sigma\rho \qquad a'' = 12^{m}38.$

$I_{X^2} = b''^2\ \Sigma\rho \qquad b'' = 2^{m}83.$

Sur l'épure Pl. II, on a tracé l'ellipse en traits discontinus.

3. — Théorème de Culmann p. 122.

§ 4. — *MOMENTS CENTRIFUGES DES φ PAR RAPPORT : D'UNE PART A UNE FORCE VERTICALE, D'AUTRE PART A* XX *(FUNICULAIRE* **5**, Pl. II)

On suspend verticalement aux antipôles de XX les moments des φ (*φy*, funiculaire **2**).

On trace un polygone des forces de pôle O^V placé sur le premier côté de **3** et de distance polaire $p^V = \overset{B}{\underset{A}{\Theta}} = 3^m86$.

5 est en chapeau de gendarme : ses côtés extrêmes se confondent; suivant des parallèles à ces côtés, il est symétrique par rapport à YY.

§ 5. — *RÉACTIONS DUES A UNE CHARGE VERTICALE* (Pl. II)

Art. 1. — Réactions de $V_5 = 1^T$, appliquée au milieu du joint séparant les tranches 4, 5.

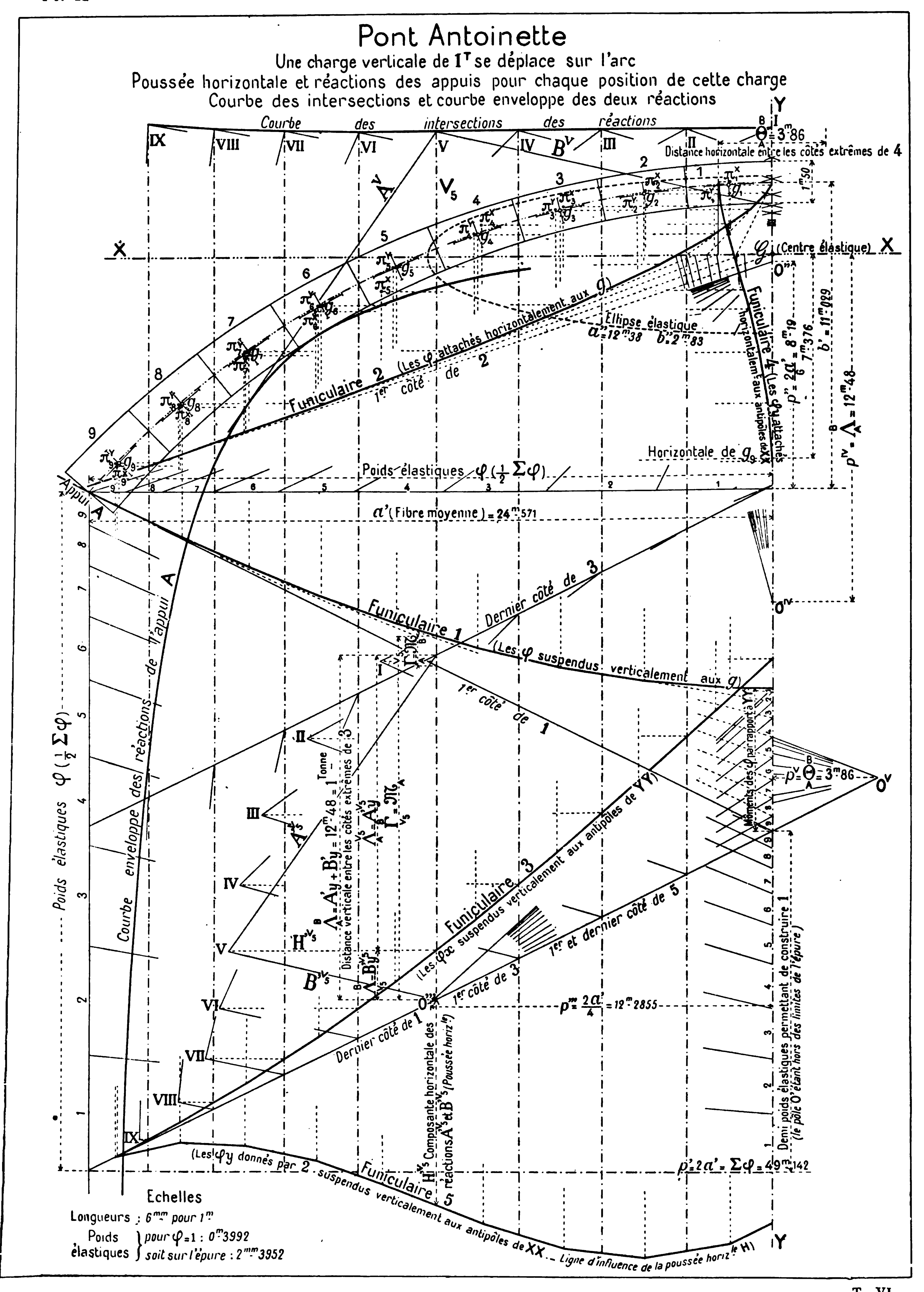
On a de suite, sur la verticale de V_5, par le funiculaire **3** : $A'^{V_5}_y$ et $B'^{V_5}_y$ composantes verticales des 2 réactions ; par le **5**, H'^{V_5} composante horizontale des 2 réactions, puis les réactions A^{V_5} et B^{V_5} (intensité et direction), puis, par les moments $\mathcal{M}$ mesurés sur **1**, leurs lignes de force, vérifiées par leurs coordonnées à l'origine.

Pour $V = 1^T$, on divisera les forces par $\overset{B}{\underset{A}{\Lambda}} = 12^m48$.

Art. 2. — Réactions dues à une charge de 1^T appliquée au milieu de toutes les sections qui séparent les tranches.

TABLEAU V.

	Emplacement de la charge		Unités	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX
Longueurs d'après l'épure à l'échelle de 3^{cm} p. 1^m		$\overset{B}{\underset{V}{\Gamma}} = \mathcal{M}_A$	m	5.190	6.850	8.757	10.860	13.100	15.467	17.833	20.213	22.483
		$\overset{V}{\underset{A}{\Gamma}} = \mathcal{M}_B$	m	5.190	3.783	2.633	1.733	1.067	0.600	0.287	0.117	0.027
	Réactions des appuis, composantes	H'	m	14.133	13.617	12.150	10.000	7.517	5.000	2.867	1.267	0.310
		A'_y	m	6.240	7.523	8.730	9.803	10.710	11.410	11.903	12.260	12.427
		B'_y	m	6.240	4.957	3.750	2.677	1.770	1.070	0.577	0.220	0.053
	Réactions des appuis	A'	m	15.450	15.533	14.950	13.983	13.067	12.450	12.200	12.267	12.383
		B'	m	15.450	14.467	12.700	10.333	7.700	5.100	2.917	1.267	0.320
H (composante horiz^le des réactions)		$\frac{H'}{\Lambda_A^B}$	T	1.132	1.091	0.974	0.801	0.602	0.401	0.230	0.102	0.025
Réactions de l'appui de gauche **A**	**A** (intensité)	$\frac{A'}{\Lambda_A^B}$	T	1.238	1.245	1.198	1.120	1.047	0.998	0.978	0.983	0.992
	r (distance à $\mathcal{G}$)	$\frac{\mathcal{M}_A}{A}$	m	4.192	5.502	7.310	9.696	12.512	15.498	18.234	20.562	22.664
	coordonnées à l'origine : abscisse	$\frac{\mathcal{M}_A \Lambda_A^B}{A'_y}$	m	10.380	11.364	12.519	13.826	15.265	16.917	18.697	20.576	22.579
	coordonnées à l'origine : ordonnée	$\frac{\mathcal{M}_A \Lambda_A^B}{H'}$	m	4.583	6.278	8.995	13.553	21.749	38.605	77.627	199.100	937.380
Réactions de l'appui de droite **B**	**B** (intensité)	$\frac{B'}{\Lambda_A^B}$	T	1.238	1.159	1.018	0.828	0.617	0.409	0.234	0.101	0.026
	r (distance à $\mathcal{G}$)	$\frac{\mathcal{M}_B}{B}$	m	4.192	3.264	2.586	2.092	1.729	1.467	1.227	1.158	1.038
	coordonnées à l'origine : abscisse	$\frac{\mathcal{M}_B \Lambda_A^B}{B'_y}$	m	10.380	9.524	8.763	8.079	7.523	6.998	6.208	6.637	6.358
	coordonnées à l'origine : ordonnée	$\frac{\mathcal{M}_B \Lambda_A^B}{H'}$	m	4.583	3.467	2.705	2.162	1.771	1.498	1.249	1.152	1.087


Pont Antoinette
Une charge verticale de 1T se déplace sur l'arc
Poussée horizontale et réactions des appuis pour chaque position de cette charge
Courbe des intersections et courbe enveloppe des deux réactions
Courbe des intersections des réactions
Distance horizontale entre les côtés extrêmes de 4
(Centre élastique)
Ellipse élastique
Funiculaire 2 (Les φ attachés horizontalement aux g)
1er côté de 2
Funiculaire 4 (Les φ attachés horizontalement aux antipôles de XX)
Horizontale de g9
Poids élastiques φ (½ Σφ)
Appui A
a'(Fibre moyenne) = 24m571
Funiculaire 1 (Les φ suspendus verticalement aux g)
Dernier côté de 3
1er côté de 1
Courbe enveloppe des réactions de l'appui A
Poids élastiques φ (½ Σφ)
Distance verticale entre les côtés extrêmes de 3
Funiculaire 3 (Les φx suspendus verticalement aux antipôles de YY)
1er et dernier côté de 5
1er côté de 3
Dernier côté de 1
Moments des φ par rapport à YY
Demi poids élastiques permettant de construire 1 (le pôle O' étant hors des limites de l'épure)
Composante horizontale des réactions (Poussée horiz.le)
(Les φy donnés par 2 suspendus verticalement aux antipôles de XX) Funiculaire 5
Ligne d'influence de la poussée horiz.le H
Echelles
Longueurs : 6mm pour 1m
Poids élastiques pour φ=1 : 0m3992 soit sur l'épure : 2mm3952

§ 6. — *COURBE DES INTERSECTIONS ET COURBE ENVELOPPE DES RÉACTIONS* (p. 140)

Joignons par une courbe continue les points de rencontre sur chaque charge de ses 2 réactions, puis traçons la courbe tangente à toutes les réactions R_A, à toutes les réactions R_B.

Ces 2 courbes permettent de construire les réactions dues à une charge quelconque W.

CHAPITRE II

TRAVAIL PAR $\overline{0^m01}^2$ SOUS LE POIDS MORT

§ 1. — *POIDS DES TRANCHES ET SUR LES TRANCHES*

TABLEAU VI.

Numéros		Poids [4] (a)			
des tranches	des poids des voûtes d'élégissement	des tranches elles-mêmes (appliquées aux centres de gravité *g*).	sur les tranches: Tympans pleins	sur les tranches: Voûtes d'élégissement Tympans piles	Totaux
1	2	3	4	5	6
		T	T		T
1 (clef)		11.97	5.97		17.94
2		12.18	7.18		19.36
3		12.62	11.19		23.81
4		13.24	16.15	(demi-voûte) 20.44	29.39
5		14.11			24.33
6		15.26		2	15.26
	6bis		Pile	26.43	26.43
7		16.69			16.69
8		18.38			18.38
	8bis		Pile	37.62	37.62
9 (ret.)		20.30			20.30
		Charge permanente totale = (demi-arc).			T 249.51

(a)

		T
Poids du m. c.		
Maçonneries	pierre.......	2.5
	briques......	1.6
Béton......................		2.3
Remplissage entre têtes.....		2.0

§ 2. — *RÉSULTANTE $\mathcal{R}$ DES RÉACTIONS D'UN APPUI DANS UNE VOÛTE SYMÉTRIQUE ET SYMÉTRIQUEMENT CHARGÉE DE POIDS VERTICAUX*

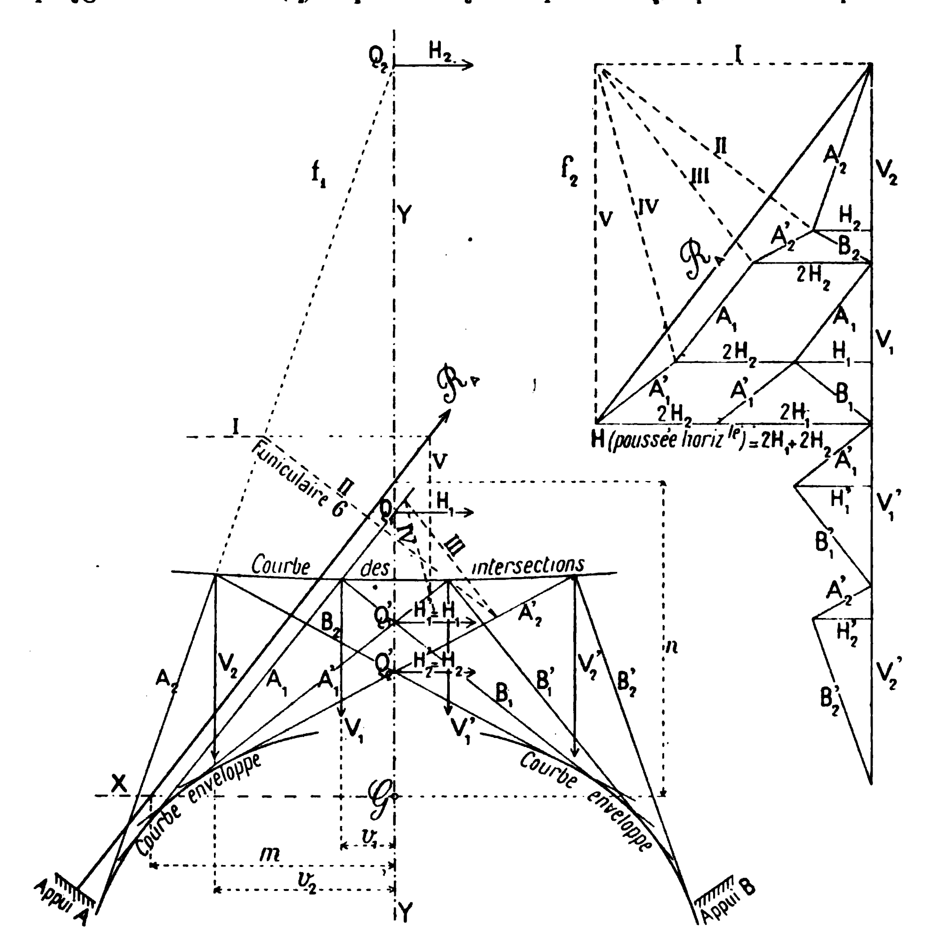
Art. 1. — Construction graphique.

Soient $V_1V'_1$, $V_2V'_2$, des groupes de poids égaux et symétriques (f_1). A l'aide de la courbe des intersections et de la courbe enveloppe des réactions, décomposons chaque poids en ses 2 réactions.

A_1 et B'_1, A_2 et B'_2, B_1 et A'_1, B_2 et A'_2 se coupent sur YY, sont symétriques par rapport à YY et à l'horizontale de leur point de rencontre.

4. — Toutes les largeurs (dimensions normales au rail), ont été divisées par 4^m74, largeur au niveau du rail.

Au polygone des forces (f_2), A'_2 est le symétrique de B_2, A'_1 celui de B_1.



La réaction résultante $\mathscr{R}_A$ de l'appui A ferme le polygone $A_2A'_2A_1A'_1$; on la met en place à l'aide d'un funiculaire **6** (f_1).

En raison de la symétrie, on ne fait la construction que pour la demi-arche.

Art. 2. — Vérification. — Calcul des ordonnées à l'origine de $\mathscr{R}_A$[6].

Prenons les moments autour du centre élastique $\mathcal{G}$ de la résultante $\mathscr{R}_A$ et de ses composantes A_1, A_2, A'_1, A'_2.

$$\mathfrak{M}^t \text{ (de } \mathscr{R}_A) = \mathfrak{M}^t \text{ de } A_2 + \mathfrak{M}^t \text{ de } A_1 + \mathfrak{M}^t \text{ de } A'_1 + \mathfrak{M}^t \text{ de } A'_2$$

$$\mathfrak{M}^t \text{ de } A_2 = \mathcal{G}Q_2 \times H_2 = (\mathcal{G}Q'_2 + Q'_2Q_2)\, H_2 = \mathcal{G}Q_2 \times H_2 + Q'_2Q_2 \times H_2$$

$$= \mathcal{G}Q'_2 \times H'_2 \text{ (puisque } H'_2 = H_2) + v_2V_2 \left(\begin{matrix}\text{Moment de } A_2 \text{ autour de } Q'_2 \\ = Q'_2Q_2 \times H_2\end{matrix}\right)$$

de même :

$$\mathfrak{M}^t \text{ de } A_1 = \mathcal{G}Q'_1 \times H'_1 + v_1 V_1 \qquad \mathfrak{M}^t \text{ de } A'_1 = \mathcal{G}Q'_1 \times H'_1 \qquad \mathfrak{M}^t \text{ de } A'_2 = \mathcal{G}Q'_2 \times H'_2$$

$$\mathfrak{M}^t \text{ de } \mathscr{R}_A = 2\mathcal{G}Q'_1 \times H'_1 + 2\mathcal{G}Q'_2 \times H'_2 + v_2V_2 + v_1V_1$$

$$= 2\Sigma H h \left(\begin{matrix}\text{moments des H} \\ \text{1/2 arche de droite}\end{matrix}\right) + \Sigma V v \left(\begin{matrix}\text{moment des V} \\ \text{sur une 1/2 arche}\end{matrix}\right).$$

6. — M. Guidi — *L'arco elastico senza cerniere.*

Soient m et n les coordonnées à l'origine de $\mathcal{R}_A$:

$$\mathfrak{M}^t \text{ (de } \mathcal{R}_A) = m\Sigma V \text{ (poids mort)} = n2\Sigma H \text{ (poussée).}$$

Voici les calculs pour le pont Antoinette.

TABLEAU VII.

Nos des tranches	Ordonnées de la ligne d'influence de H (funiculaire 5) de la Pl. II	Poussées horizontales (col. 2) × (col. 6 du Tableau VI) $\mathcal{H}$	Réactions de l'appui de gauche produites par les charges sur la demi-voûte de droite: Distances verticales de ces réactions au centre élastique $\mathcal{G}$ h (à prendre sur la Pl. II).	Moments des réactions autour de $\mathcal{G}$ $\mathcal{H}h$
1	2	3	4	5
		T		mT
1 (clef)	1m132	20.29	3m950	80.15
2	1.030	19.94	3.050	60.82
3	0.880	20.95	2.390	50.07
4	0.680	19.98	1.910	38.16
5	0.520	12.65	1.640	20.75
6	0.306	4.67	1.350	6.30
6bis	0.244	6.45	1.280	8.25
7	0.155	2.59	1.190	3.08
8	0.052	0.95	1.120	1.06
8bis	0.029	1.09	1.100	1.20
9 (retombée)	0.003	0.06	1.025	0.06

$\frac{\mathcal{H}}{2}$ (demi-poussée) $= \Sigma H = 109^T.62$ $\qquad \Sigma Hh = 269^{mT}.90$

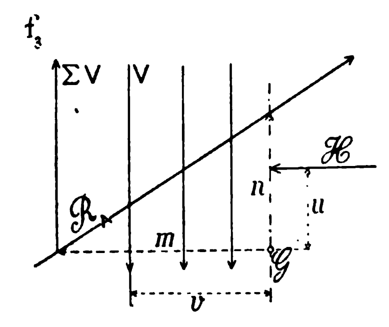
$\mathcal{H}$ (poussée) $= 219^T.24$

$\mathfrak{M}^t$ de $\mathcal{R}_A = 2 \times 269.90$ (ΣHh, Tableau VII col. 5) $+ 3664.59$ (ΣVv) $= 4204^{mT}.39$

$$m = \frac{4204^{mT}.39}{249^T51 \text{ (poids mort) Tableau VI}} = 16^m851$$

$$n = \frac{4204^{mT}.39}{2 \times 109^T62 \text{ (poussée) Tableau VII}} = 19^m177$$

§ 3. — *TRACÉ DU FUNICULAIRE DES PRESSIONS, EN SE SERVANT DE LA RÉACTION RÉSULTANTE $\mathcal{R}_A$ DE L'APPUI*



On trace le funiculaire des charges ayant comme premier côté $\mathcal{R}_A$ mise en place : c'est le polygone des pressions.

Il est bon de vérifier par le calcul son point de passage à la clef :

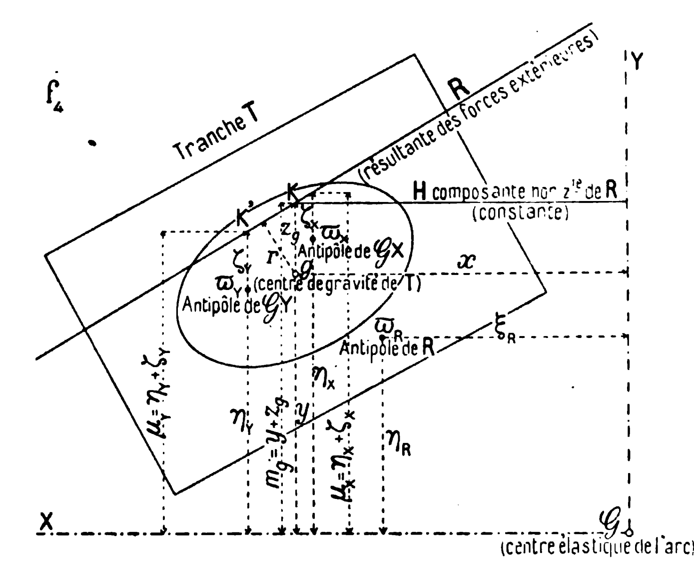
$$u\mathcal{H} = m\Sigma V - \Sigma Vv = 2\Sigma Hh = 539^{mT}.80$$

$$u = 2^m.462$$

La courbe des pressions du poids mort est tout entière dans le 1/3 central : elle s'écarte peu de la fibre moyenne.

§ 4. — *COMMENT, DANS UN ARC SYMÉTRIQUE ET SYMÉTRIQUEMENT CHARGÉ DE POIDS VERTICAUX, ON TRACE LE FUNICULAIRE DES PRESSIONS, SANS AVOIR AU PRÉALABLE CONSTRUIT LES RÉACTIONS DES APPUIS. MÉTHODE DE M. GUIDI* [7]

Art. 1. — Si, par des verticales on transporte sur la courbe des pressions les centres de gravité des tranches et les antipôles de l'axe $\mathcal{G}$Y par rapport aux ellipses centrales des tranches, et qu'on construise une ellipse des poids élastiques ainsi déplacés, elle a même centre $\mathcal{G}$, mêmes axes de symétrie $\mathcal{G}$Y, $\mathcal{G}$X que l'ellipse élastique de l'arc.



La résultante R des efforts sur une tranche T (f_4) fait tourner sa section extrême de droite par rapport à sa section extrême de gauche de : $\Delta\theta = Rr\left(\frac{L}{EI}\right) = Rr\varphi$ autour de l'antipôle ϖ_R de R. [8]

Les déplacements du centre élastique $\mathcal{G}$, origine des coordonnées, considéré comme invariablement lié à l'appui de droite supposé libre, sont :

$$\Delta\theta = Rr\varphi \qquad \Delta Y = Rr\varphi\xi_R \qquad \Delta X = Rr\varphi\eta_R$$ [9]

Pour l'arc entier, ensemble des tranches, la somme des déplacements élastiques entre deux appuis invariables est nulle.

$$\Sigma\Delta\theta = 0 \qquad \Sigma\Delta Y = 0 \qquad \Sigma\Delta X = 0$$

ou $$\sum_A^B Rr\varphi = 0 \qquad \sum_A^B Rr\varphi\xi_R = 0 \qquad \sum_A^B Rr\varphi\eta_R = 0$$

Soit H la composante horizontale de R, laquelle est la même pour toutes les tranches, uisque l'arc n'est soumis qu'à des forces verticales :

$$Rr = Hz_g$$

$$\sum_A^B Hz_g\varphi = 0 \qquad \sum_A^B Hz_g\xi_R\varphi = 0 \qquad \sum_A^B Hz_g\eta_R\varphi = 0$$

Divisons par la constante H :

$$\sum_A^B z_g\varphi = 0 \qquad \sum_A^B z_g\xi_R\varphi = 0 \qquad \sum_A^B z_g\eta_R\varphi = 0$$

Soient ϖ_X, ϖ_Y les antipôles des deux axes $\mathcal{G}$X, $\mathcal{G}$Y.

Le moment centrifuge de la masse φ par rapport aux deux axes R et $\mathcal{G}$Y peut s'écrire indifféremment [10] $\varphi z_g\xi_R$ ou $\varphi\zeta_Y x$. Donc $z_g\xi_R = \zeta_Y x$.

7. — *L'arco elastico senza cerniere* — Académie des sciences de Turin — Novembre 1902. *Contributo alla teoria degli archi elastici.* Mai 1908.

8. — VI, p. 125. 9. — VI, p. 130. 10. — Théorème de Culmann, VI, p. 122.

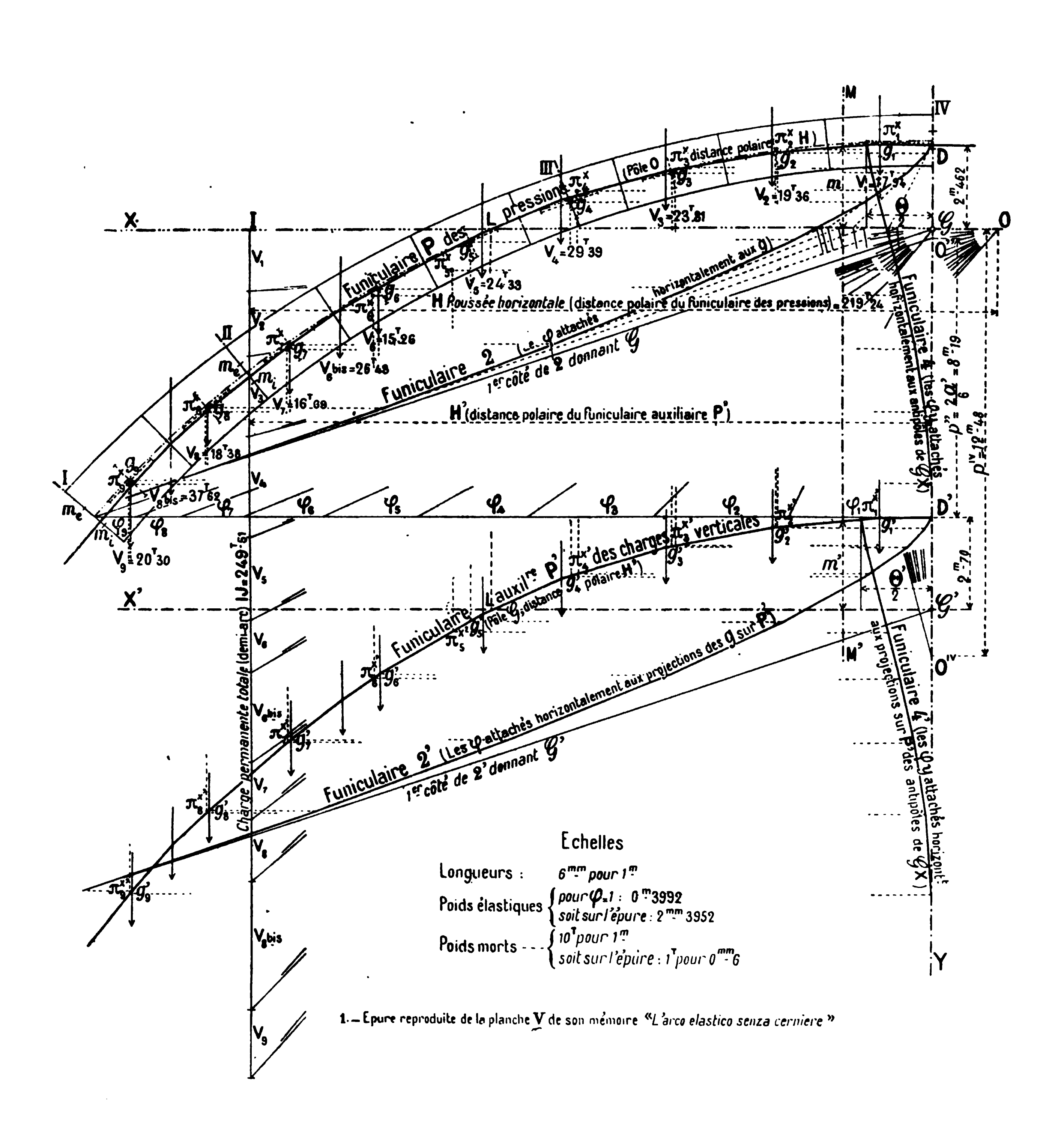
Pont Antoinette

Courbe de pression sous les poids morts

tracée à l'aide d'un funiculaire auxiliaire P'

sans avoir construit la courbe des intersections ni la courbe enveloppe des réactions.

(Méthode de M. Guidi) [1]



De même le moment centrifuge de φ par rapport à R et $\mathcal{G}$X s'écrira :

$$\varphi z_g \eta_R \quad \text{ou} \quad \varphi \zeta_X y \ . \qquad \text{Donc} \quad z_g \eta_R = \zeta_X y$$

Les trois équations précédentes deviennent :

$$\sum_A^B z_g \varphi = 0 \qquad \sum_A^B \zeta_Y x \varphi = 0 \qquad \sum_A^B \zeta_X y \varphi = 0$$

soit, en posant $z_g = m_g - y \qquad \zeta_Y = \mu_Y - \eta_Y \qquad \zeta_X = \mu_X - \eta_X$

$$\sum_A^B m_g \varphi - \sum_A^B y \varphi = 0 \qquad \sum_A^B \mu_Y x \varphi - \sum_A^B \eta_Y x \varphi = 0 \qquad \sum_A^B \mu_X y \varphi - \sum_A^B \eta_X y \varphi = 0$$

$\mathcal{G}$X est un axe de l'ellipse élastique de l'arc : donc $\sum_A^B y \varphi = 0$

$\mathcal{G}$X, $\mathcal{G}$Y sont les 2 axes : donc $\sum_A^B \eta_Y x \varphi \left(\begin{array}{c}\text{moment centrifuge des } \varphi \\ \text{par rapport à } \mathcal{G}X \text{ et } \mathcal{G}Y\end{array}\right) = 0$

Les trois équations se réduisent à

$$\sum_A^B m_g \varphi = 0 \qquad \sum_A^B \mu_Y x \varphi = 0 \qquad \sum_A^B \mu_X y \varphi - \sum_A^B \eta_X y \varphi = 0$$

Attachons en K le poids élastique φ.

Si $\sum_A^B m_g \varphi = 0$, c'est que $\mathcal{G}$X passe par le centre de gravité des φ attachés en K ; $\mathcal{G}$Y, axe de symétrie, y passe évidemment.

$\sum_A^B \varphi \mu_Y x$ est le moment centrifuge des φ dont K serait le centre de gravité, K' l'antipôle.

S'il est nul, c'est que $\mathcal{G}$X, $\mathcal{G}$Y, axes de l'ellipse centrale des masses φ attachées aux centres de gravité g des tranches, sont encore les axes de l'ellipse des φ attachées à l'intersection des verticales des g et de la courbe des pressions à construire.

Art. 2. — Construction du funiculaire des pressions à l'aide d'un funiculaire auxiliaire (Pl. III).

Soient : V_1, V_2,..... les poids agissant sur l'arc.

Sur une horizontale D', plaçons les poids élastiques φ ; traçons un polygone des φ avec le pôle O", la distance polaire O" D' $= p"$ $\left(= \frac{2a'}{6} = 8^m19\right)$, puis le funiculaire **2** (le même que Pl. II), qui place le centre élastique $\mathcal{G}$ des φ attachées aux g des tranches.

A un point I de $\mathcal{G}$X à une distance arbitraire H' de $\mathcal{G}$ (ici H' $= 20^m$), suspendons verticalement les poids morts $V_1 V_2$..... et traçons un polygone des forces V avec le pôle $\mathcal{G}$, la distance polaire H', puis le funiculaire auxiliaire **P'**.

Aux points d'intersection g'_1, g'_2,..... des côtés de **P'** avec les verticales de g_1, g_2,..... appliquons horizontalement les poids élastiques $\varphi_1 \varphi_2$,.... ; à l'aide du polygone O" de distance polaire $p"$, traçons le funiculaire **2'** ; son premier côté coupe $\mathcal{G}$Y au centre de gravité $\mathcal{G}'$.

Supposons pour un instant tracé le funiculaire **P** des pressions à construire ; soient O le pôle, OI = H la distance polaire (poussée horizontale), OIJ son polygone des forces.

Les 2 funiculaires **P, P'** sont relatifs aux mêmes forces verticales V_1, V_2... ; soient m, m' les segments interceptés sur une verticale MM' par des droites homologues.

$$Hm = H'm' \quad [11]$$

Les axes $\mathcal{G}X$, $\mathcal{G}'X'$ sont « homologues ». Leurs intersections L et L' avec **P** et **P'** sont sur une même verticale.

On a ainsi un premier point L de **P**.

Reprenons la troisième équation (p. 153), $\sum_A^B \mu_X y\varphi = \sum_A^B \eta_X y\varphi$.

Multiplions ses 2 termes par la constante H.

$$\sum_A^B H\mu_X y\varphi = H\sum_A^B \eta_X y\varphi .$$

Comme on vient de le voir, $H\mu_X = H'\mu'_X$

$$\sum_A^B H'\mu'_X y\varphi = H'\sum_A^B \mu'_X y\varphi = H\sum_A^B \eta_X y\varphi$$

$$H = H' \frac{\sum_A^B \mu'_X y\varphi}{\sum_A^B \eta_X y\varphi}$$

$\sum_A^B \eta_X y\varphi$ est le moment d'inertie de l'arc par rapport à $\mathcal{G}X$ (f_4).

Soit $\overset{B}{\underset{A}{\Theta}} = 3^m86$ la distance horizontale des côtés extrêmes du funiculaire **4** (Pl. II)

$$\sum_A^B \eta_X y\varphi = \overset{B}{\underset{A}{I}}_{X'} = p''p^{IV}\overset{B}{\underset{A}{\Theta}}$$

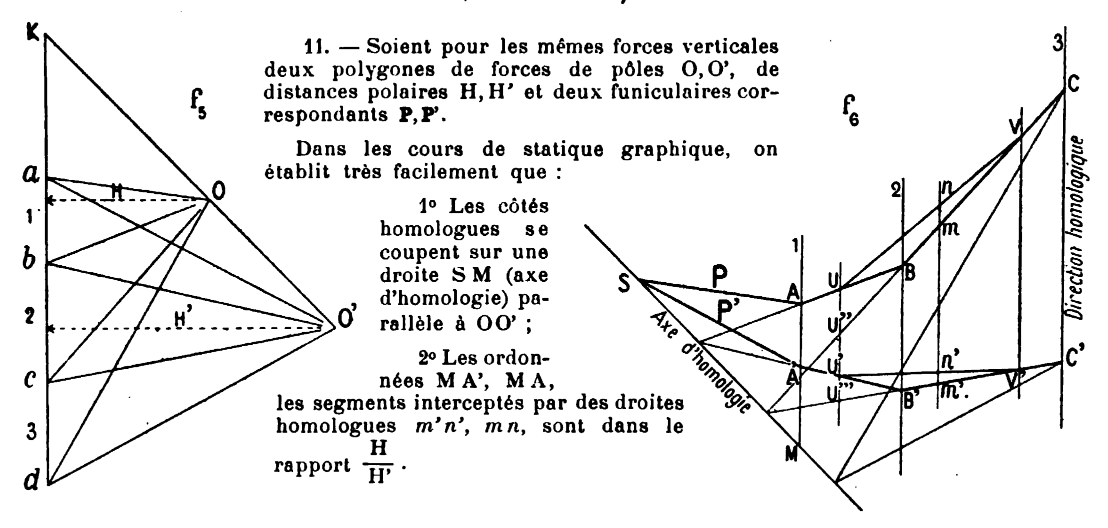
Pour avoir $\sum_A^B \mu'_X y\varphi$, projetons verticalement sur **P'** les antipôles de $\mathcal{G}X$; à ces projections, attachons horizontalement les moments statiques $\frac{\varphi y}{p''}$ (ils sont donnés par le funiculaire **2** sur $\mathcal{G}X$). Traçons avec le pôle O^{IV} et la distance polaire p^{IV} un funiculaire **4'** : ses côtés sont parallèles à ceux de 4.

Soit $\Theta' = 4^m23$ la distance horizontale de ses côtés extrêmes :

$$\sum_A^B \mu'_X y\varphi = p''p^{IV}\Theta'$$

$$H = H'\frac{\Theta'}{\Theta} \left(\text{soit, sur l'épure : } 200 \times \frac{4.23}{3.86} = 219^T{,}24\right)$$ Valeur trouvée autrement p. 151, tableau VII

$$\mathcal{G}D = \mathcal{G}'D' \times \frac{H'}{H} = \left(2^m70 \times \frac{200}{219{,}24} = 2^m462\right)$$ Valeur trouvée autrement p. 151, § 3.



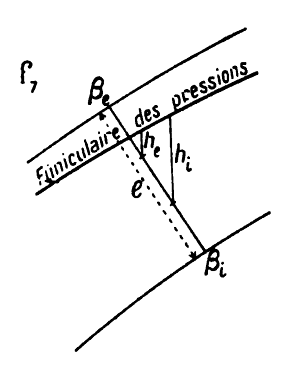
11. — Soient pour les mêmes forces verticales deux polygones de forces de pôles O, O', de distances polaires H, H' et deux funiculaires correspondants **P**, **P'**.

Dans les cours de statique graphique, on établit très facilement que :

1° Les côtés homologues se coupent sur une droite SM (axe d'homologie) parallèle à OO' ;

2° Les ordonnées MA', MA, les segments interceptés par des droites homologues $m'n'$, mn, sont dans le rapport $\frac{H}{H'}$.

§ 5. — *TRAVAIL PAR $\overline{0^m01}^2$, AU POIDS MORT, A LA CLEF, SUR L'APPUI, ET DANS 2 SECTIONS INTERMÉDIAIRES*



Section (Pl. III)	I (appui)	II	III	IV (clef)
Épaisseur de la voûte e	2^m283	1^m99	1^m63	1^m50
Largeur de l'ouvrage l	5^m76	5^m42	5^m02	4^m88
$\frac{1}{6}\frac{l}{4,74}e^2 = J$ (voir plus bas)	1.056	0.755	0.469	0.386
Bras de levier à mesurer sur l'épure. Distance verticale des bords du noyau central au funiculaire des pressions. h_i	0^m28	0^m27	0^m38	0^m15
h_e	0^m85	0^m58	0^m18	0^m35
$\mathfrak{M}_i = H\,(219^T24)\,h_i$	$61^{mT}39$	$59^{mT}19$	$83^{mT}31$	$32^{mT}89$
$\mathfrak{M}_e = H h_e$	$186^{mT}35$	$127^{mT}16$	$39^{mT}46$	$76^{mT}73$
Efforts par $\overline{0^m,01}^2$ à l'intrados $\beta_i = \frac{\mathfrak{M}_e}{10J}$ (voir plus bas).	17^k7	16^k8	8^k4	19^k9
à l'extrados $\beta_e = \frac{\mathfrak{M}_i}{10J}$ (voir plus bas).	5^k8	7^k8	17^k8	8^k5

CHAPITRE III

EFFORTS PAR $\overline{0,01}^2$ DUS AUX SURCHARGES ROULANTES

§ 1. — *SURCHARGE ROULANTE ISOLÉE DE 1^T*

Art. 1. — Moment de l'effort sur une section S par rapport aux bords du noyau central.

Soit V une surcharge isolée de 1^T ; à l'aide de la courbe des intersections des réactions et de leur enveloppe, on construit ses deux réactions A et B de composante horizontale H.

Soient S une section, h_i, h_e les distances verticales à A des bords m_i, m_e du noyau central de S

$$\begin{pmatrix} h_i > 0 \text{ au-dessus de } m_i, & < 0 \text{ au-dessous} \\ h_e < 0 \text{ au-dessus de } m_e, & > 0 \text{ au-dessous} \end{pmatrix}$$

La poussée H est mesurée sur la verticale de V par l'ordonnée du funiculaire **5** (Pl. II) divisée par $\overset{3}{\underset{A}{A}}$, funiculaire **3**.

$$\text{Soit } J = \frac{1}{6}e^2\begin{pmatrix}\text{épaisseur de}\\ \text{la voûte en S}\end{pmatrix} \times l\left(\frac{\text{largeur de la voûte}}{4^m,74}\right)$$

Le travail par $\overline{0^m,01}^2$ dans la section S dû à la surcharge de 1^T placée en V, est (p. 141) :

$$\text{à l'intrados} \quad \beta_i = \frac{Hh_e}{10J} \qquad \text{à l'extrados} \quad \beta_e = \frac{Hh_i}{10J}$$

(H en tonnes, h_e, h_i, e en mètres)

Art. 2. — Lignes d'influence de β_i et β_e pour 4 sections : la retombée (section I), 2 autres sections (II, III), et la clef (IV).

On a fait les calculs de l'art. 1 pour ces 4 sections et pour 11 positions de la surcharge V : ils sont résumés au tableau VIII. On a tracé ensuite les lignes d'influence de β_i et β_e (Pl. IV).

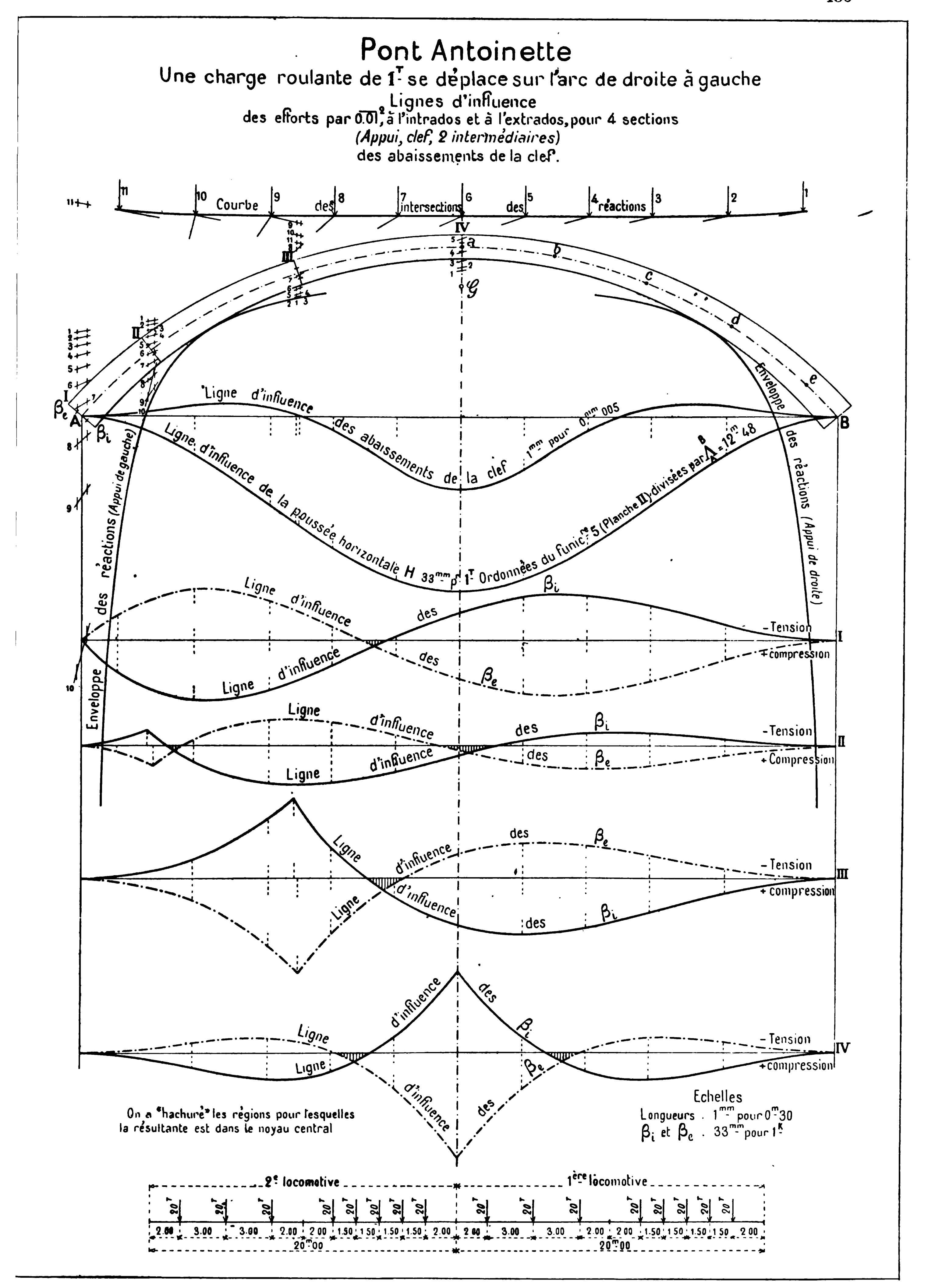
TABLEAU VIII. — *Une surcharge roulante isolée de 1 T. se déplaçant de droite à gauche, occupe successivement 11 positions (1 à 11. col. 1)*

Calcul pour 4 sections (appui, clef et 2 intermédiaires), des efforts par $\overline{0{,}01}^2$ *à l'intrados et à l'extrados.*

Positions de la surcharge		Poussées horizontales	Section I. — Appui de gauche. J = 1.056						Section II. — J = 0.755						Section III. — J = 0.469						Section IV — clef. — J = 0.386					
Nos	Distances à la Clef	H	h_e	h_i	Hh_e	Hh_i	$\beta_i = \frac{Hh_e}{10J}$	$\beta_e = \frac{Hh_i}{10J}$	h_e	h_i	Hh_e	Hh_i	$\beta_i = \frac{Hh_e}{10J}$	$\beta_e = \frac{Hh_i}{10J}$	h_e	h_i	Hh_e	Hh_i	$\beta_i = \frac{Hh_e}{10J}$	$\beta_e = \frac{Hh_i}{10J}$	h_e	h_i	Hh_e	Hh_i	$\beta_i = \frac{Hh_e}{10J}$	$\beta_e = \frac{Hh_i}{10J}$
	m	T	m	m			k	k	m	m			k	k	m	m			k	k	m	m			k	k
1	22.24	0.030	— 5.10	+ 5.67	—0.153	+0.170	—0.0145	+0.0161	—1.65	+2.25	—0.049	+0.067	—0.0065	+0.0089	+1.81	—1.27	+0.054	—0.038	+0.0115	—0.0081	+1.77	—1.27	+0.053	—0.038	+0.0137	—0.0098
2	17.28	0.245	— 4.78	+ 5.35	—1.171	+1.311	—0.1109	+0.1243	—1.44	+2.05	—0.353	+0.502	—0.0467	+0.0665	+1.80	—1.26	+0.441	—0.309	+0.0940	—0.0659	+1.55	—1.05	+0.380	—0.257	+0.0984	—0.0666
3	12.40	0.580	— 4.20	+ 4.81	—2.436	+2.790	—0.2307	+0.2642	—1.07	+1.69	—0.621	+0.980	—0.0822	+0.1298	+1.79	—1.23	+1.038	—0.713	+0.2213	—0.1520	+1.12	—0.62	+0.649	—0.360	+0.1681	—0.0933
4	8.25	0.860	— 3.58	+ 4.22	—3.079	+3.629	—0.2916	+0.3437	—0.65	+1.30	—0.559	+1.118	—0.0740	+0.1481	+1.74	—1.18	+1.496	—1.015	+0.3190	—0.2164	+0.54	—0.04	+0.464	—0.034	+0.1202	—0.0088
5	4.13	1.060	— 2.78	+ 3.45	—2.947	+3.657	—0.2791	+0.3463	—0.17	+0.85	—0.180	+0.901	—0.0238	+0.1193	+1.59	—1.00	+1.685	—1.060	+0.3593	—0.2260	—0.36	+0.86	—0.382	+0.912	—0.0990	+0.2363
6 Clef		1.132	— 1.62	+ 2.40	—1.831	+2.717	—0.1734	+0.2572	+0.47	+0.23	+0.532	+0.260	+0.0703	+0.0344	+1.24	—0.65	+1.403	—0.735	+0.2989	—0.1567	—1.81	+2.31	—2.049	+2.615	—0.5308	+0.6775
7	4.13	1.060	— 0.17	+ 1.00	—0.180	+1.060	—0.0170	+0.1004	+1.25	—0.49	+1.325	—0.519	+0.1755	—0.0687	+0.46	+0.17	+0.488	+0.180	+0.1041	+0.0384						
8	8.25	0.860	+ 2.05	— 1.05	+1.763	—0.903	+0.1670	—0.0855	+2.17	—1.28	+1.866	—1.101	+0.2471	—0.1458	—1.07	+1.99	—0.920	+1.711	—0.1962	+0.3648						
		0.710														+4.04		+2.868		+0.6115						
		0.695													—3.52		—2.446		—0.5215							
9	12.40	0.580	+ 5.90	— 4.58	+3.422	—2.656	+0.3241	—0.2515	+3.29	—2.15	+1.908	—1.247	+0.2527	—0.1652	—3.14	+3.60	—1.821	+2.088	—0.3882	+0.4452						
10	17.28	0.245	+16.87	—14.18	+4.133	—3.474	+0.3914	—0.3290	+3.19	—1.00	+0.781	—0.245	+0.1034	—0.0324	—2.28	+2.75	—0.559	+0.674	—0.1192	+0.1437						
		0.110								+9.20		+1.012		+0.1340												
		0.095							—8.70		—0.826		—0.1094													
11	22.24	0.030	—13.48 [12]	+13.87 [12]	+2.196	—1.604	+0.2079	—0.1519	—8.50	+8.95	—0.255	+0.268	—0.0338	+0.0355	—1.83	+2.31	—0.055	+0.069	—0.0117	+0.0147						

12. — On ne peut pas tracer A_{11}. On considère l'autre composante B_{11} dont le moment est diminué de celui de la résultante $V_{11} = 1^T$.

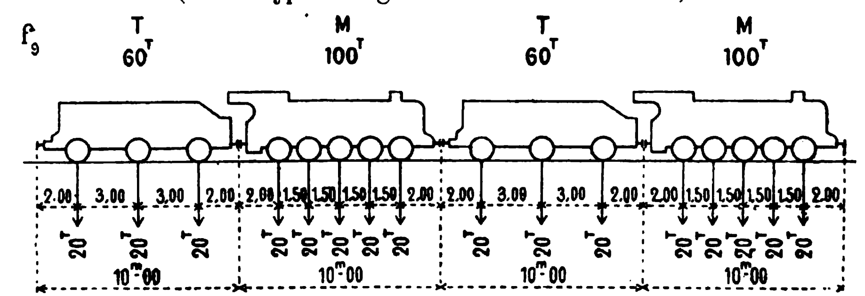
$$\begin{cases} Hh_i = +\ 0.03 \times 13.87 - 1 \times 2.02 = -\ 1.604. \\ Hh_e = -\ 0.03 \times 13.48 + 1 \times 2.60 = +\ 2.196. \end{cases}$$



Pont Antoinette
Une charge roulante de 1T se déplace sur l'arc de droite à gauche
Lignes d'influence
des efforts par 0.01², à l'intrados et à l'extrados, pour 4 sections
(Appui, clef, 2 intermédiaires)
des abaissements de la clef.
Courbe des intersections des réactions
Ligne d'influence des abaissements de la clef 1mm pour 0mm 005
Ligne d'influence de la poussée horizontale H 33mm p. 1T Ordonnées du funic. 5 (Planche II) divisées par A = 12m 48
Enveloppe des réactions (Appui de gauche)
Enveloppe des réactions (Appui de droite)
Ligne d'influence des βi
Ligne d'influence des βe
-Tension
+compression
On a "hachuré" les régions pour lesquelles la résultante est dans le noyau central
Echelles
Longueurs . 1mm pour 0m30
βi et βe . 33mm pour 1K
2e locomotive
1ère locomotive
20m00

§ 2. — *SOUS DEUX LOCOMOTIVES DE 160^T*

(Train-type du règlement du 8 Janvier 1915)



On dessine les machines à l'échelle de l'épure ; on les déplace sur les horizontales de base des lignes d'influence ; pour chaque position, on ajoute les ordonnées correspondant aux essieux, multipliées par le poids des essieux ; on cherche pour chaque section la position des machines qui produit les plus grands efforts.

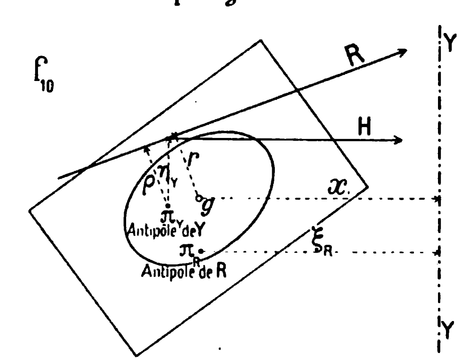
On admet que la surcharge s'étale au niveau de la plate-forme sur une bande de 4^m, c'est-à-dire que le 1/4 de la surcharge porte sur un anneau de 1^m.

TABLEAU IX. — *Maximum et minimum des efforts* β_i, β_e $(Kg. / \overline{0^m01}^2)$

Sections	β_i MAXIMUM	β_i MINIMUM	β_e MAXIMUM	β_e MINIMUM	Position du train allant de l'appui A (gauche) vers l'appui B (droite)
I	+ 10k7			— 8k5	Le 1er essieu de la 1re locomotive à 14m00 de A
		— 10k0			— 2e — 36.00 —
			+ 12k5		— 2e — 34.50 —
II	+ 6k8			— 3k6	— 1re — 19.50 —
		— 1k7	+ 4k5		— 2e — 39.00 —
III	+ 12k2			— 7k3	— 2e — 37.00 —
		— 8k9	+ 11k9		— 1re — 17.00 —
IV	+ 4k4				Une seule locomotive : Le 1er essieu à 16m50 de A
				— 2k3	— 14.50 —
		— 6k0	+ 11k1		Le 3e essieu sur la clef

§ 3. — *DÉPLACEMENTS VERTICAUX DE LA CLEF AU PASSAGE DU TRAIN D'ÉPREUVE*

Soit R la résultante des actions sur une tranche. Elle déplace verticalement le centre élastique $\mathcal{G}$ de :



$$\Delta Y = \frac{R r \varphi \xi_R}{E}$$

Mais le moment centrifuge $r\xi_R$ peut s'écrire ρx ; on a d'ailleurs

$$R\rho = H\eta_Y \quad \text{D'où :} \quad \Delta Y = \frac{H}{E}\eta_Y x \varphi$$

et pour l'ensemble des tranches, de l'appui A à la clef :

$$\mathcal{D}b = \frac{H}{E}\sum_{A}^{Clef} \eta_Y x \varphi \qquad E = 2.5 \times \overline{10}^9$$

TABLEAU X. — *Abaissement de la clef, lorsque la surcharge 1T occupe les positions* **a. b. c. d. e.** (Pl. IV)

Nos d'ordre	φ (*Tab. I, col 6*)	Abscisses des centres de gravité (*Tabl. III, col. 3*) x	φx	A la clef **a** Ordonnée de l'antipôle η	$\varphi x \eta$	A 6m12 de la clef **b** η	$\varphi x \eta$	A 12m05 de la clef **c** η	$\varphi x \eta$	A 17m51 de la clef **d** η	$\varphi x \eta$	A 22m41 de la clef **e** η	$\varphi x \eta$
1	10.4270	1m54	16.1	+ 1m20	+ 19.3	— 0m40	— 6.4	— 1m20	— 19.3	— 1m60	— 25.8	— 1m75	— 28.2
2	9.9825	4.61	46.0	+ 0.27	+ 12.4	— 0.95	— 43.7	— 1.55	— 71.3	— 1.83	— 84.2	— 1.90	— 87.4
3	9.1455	7.64	69.9	— 0.45	— 31.5	— 1.30	— 90.9	— 1.65	— 115.3	— 1.80	— 125.8	— 1.83	— 127.9
4	8.0583	10.62	85.6	— 0.90	— 77.0	— 1.35	— 115.6	— 1.48	— 126.6	— 1.50	— 128.4	— 1.47	— 125.8
5	6.9782	13.50	94.2	— 1.06	— 99.9	— 1.12	— 105.5	— 1.00	— 94.2	— 0.90	— 84.7	— 0.80	— 75.4
6	5.7437	16.24	93.3	— 0.90	— 84.0	— 0.57	— 53.2	— 0.26	— 24.3	— 0.05	— 4.7	+ 0.12	+ 11.2
7	4.6265	18.85	87.2	— 0.42	— 36.6	+ 0.25	+ 21.8	+ 0.77	+ 67.1	+ 1.15	+ 100.3	+ 1.35	+ 117.7
8	3.6973	21.28	78.7	+ 0.34	+ 26.8	+ 1.40	+ 110.2	+ 2.10	+ 165.3	+ 2.53	+ 199.1	+ 2.80	+ 220.4
9	2.8967	23.53	68.2	+ 1.44	+ 98.2	+ 2.80	+ 191.0	+ 3.70	+ 252.3	+ 4.21	+ 287.1	+ 4.50	+ 306.9
				$\Sigma\varphi x\eta =$	— 172.3		— 92.3		+ 33.7		+ 132.9		+ 211.5
Valeurs de **H** correspondant aux 5 positions de la charge. (*Tableau V*)					H=1.132		0.974		0.602		0.230		0.025
Abaissement de la clef $\frac{H}{2,5} \cdot \frac{\Sigma\varphi x\eta}{1000}$					—0mm078		— 0mm035		+ 0mm008		+ 0mm012		+ 0mm002
Pour un poids concentré de 100T sur une largeur de 4m74, soit 20T					—1mm56		— 0mm72		+ 0mm16		+ 0mm24		+ 0mm04

CHAPITRE IV

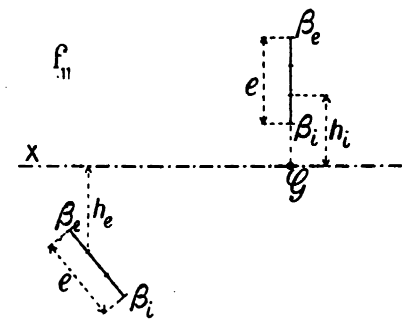
EFFET D'UN CHANGEMENT DE TEMPÉRATURE DE $\tau°$

Art. 1. — Augmentation de travail.

A un changement de température correspond [13] une translation qui est ici horizontale, donc parallèle à l'axe $\mathcal{G}$X de l'ellipse élastique ; la droite conjuguée est l'autre axe $\mathcal{G}$X. La réaction de l'appui est suivant l'axe $\mathcal{G}$X

$$H_\tau \text{ (en T)} = \frac{2a' \begin{pmatrix}\text{portée}\\ \text{en } 0.01\end{pmatrix} E \left(\text{en T}/\overline{0.01}^2 = 250\right) \times \alpha \left(\frac{8}{10^6}\right)}{\overset{B}{\underset{A}{I}}_{X'} \begin{pmatrix}\text{Moment d'inertie des}\\ \varphi \text{ par rapport à } \mathcal{G}X\end{pmatrix}} \tau$$ [14]

$2a' = 4914^c$ $\quad \overset{B}{\underset{A}{I}}_{X'} = 9.88$ (tabl. IV, col. 5) $\quad H_\tau = 0.995\,\tau$



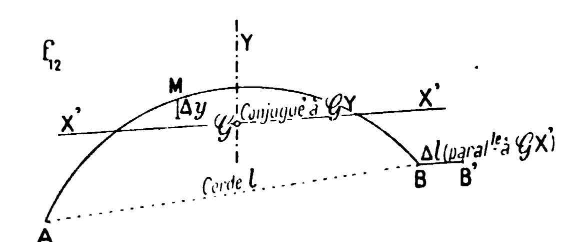
On trouve, pour un abaissement de température de $\tau°$, une augmentation d'effort de (p. 155) :

A *l'intrados* de la retombée $\beta_i = \dfrac{h_e \times 0.995 = 820^c \times 995}{1.056.000}\,\tau = +\,0.77\,\tau$

A *l'extrados* de la clef $\beta_e = \dfrac{h_i\,(220^c) \times 995}{386\,000}\,\tau = +\,0.57\,\tau$

Art. 2. — Déplacements verticaux.

Les ordonnées de la ligne d'influence de la poussée (Pl. IV) représentent à une certaine échelle, les déplacements verticaux dus à une variation de température (M. Guidi) [15].



En effet, une variation de température τ produit une poussée H_τ suivant $\mathcal{G}$X', laquelle déplace verticalement le point M (fig. 12) de :

$$\Delta y = H_\tau\,\psi\,p''p^{V} \qquad \text{(p. 138)}$$

La poussée H_τ correspond à une variation de longueur $\Delta l = \alpha\,\tau l$ de la corde l :

$$\Delta l = H_\tau\, I_{X''} \;^{16} \;=\; H_\tau \overset{B}{\underset{A}{\Theta}} p''p^{IV} \;^{17} \;=\; H_\tau\, p''p^{V} \overset{B}{\underset{A}{\Lambda}} \;^{18}$$

On a donc :

$$\frac{\Delta y}{\Delta l} = \frac{\psi}{\overset{B}{\underset{A}{\Lambda}}} = H \text{ (ordonnée du funiculaire } \mathbf{5})$$

$$\Delta y = H\,\Delta l$$

13. — p. 131. 14. — p. 144.

15. — « *Una proprietà degli archi elastici* », Turin 1905.

16. — Art. 1 ci-dessus. 17. — p. 137. 18. — p. 139.

CHAPITRE V

EFFORTS RÉSULTANTS

	Section I appui			Section II		Section III			Section IV clef	
	Intr.	Extrados		Intr.	Extr.	Intrados		Extr.	Intr.	Extr.
Poids mort (p. 155 § 5).....	$+17^{k}7$	$+5^{k}8$	$+5^{k}8$	$+16^{k}8$	$+7^{k}8$	$+8^{k}4$	$+8^{k}4$	$+17^{k}8$	$+19^{k}9$	$+8^{k}5$
Au passage de 2 machines (p. 157 tableau IX)	+10.7	+12.5	— 8.5	+ 6.8	+ 4.5	+12.2	— 8.9	+11.9	+ 4.4	+11.1
Ensemble.	$+28^{k}4$	$+18^{k}3$	$-2^{k}7$	$+23^{k}6$	$+12^{k}3$	$+20^{k}6$	$-0^{k}5$	$+29^{k}7$	$+24^{k}3$	$+19^{k}6$
A ajouter pour un changement de température de 20°..................	$+15^{k}4$									$+11^{k}4$
Total.	$+43^{k}8$									$+31^{k}0$

TITRE V

VÉRIFICATION GROSSIÈRE DES ÉPURES D'UNE VOÛTE

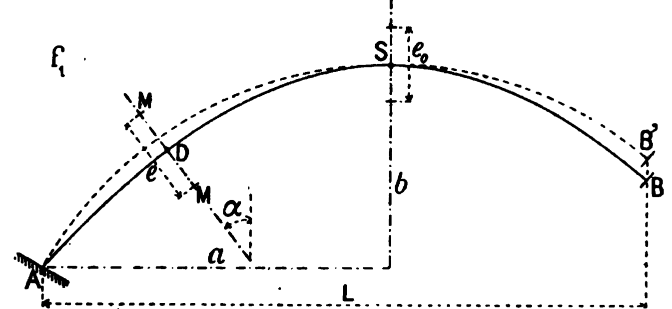
Comparaison avec celles faites pour une voûte dont la fibre moyenne est une parabole ADSB[1] de même portée L et même montée b, et pour laquelle le moment d'inertie I d'une section MM inclinée de α sur la verticale

$$= \frac{I_0 \left(\begin{matrix}\text{moment} \\ \text{à la clef}\end{matrix}\right)}{\cos\alpha} = I_0 \frac{ds}{dx} \; (f_1).^2$$

CHAPITRE I

HYPOTHÈSES

Dans tout ce qui va suivre, on supposera donc que la fibre moyenne est une parabole[3], puis que le moment d'inertie I d'une section MM a une projection verticale constante. Si la voûte a une largeur uniforme,



$$e = \frac{e_0}{\sqrt[3]{\cos\alpha}}$$

On a fait quelques voûtes à projection verticale constante :

$$e = \frac{e_0}{\cos\alpha}.^4$$

Pour les ellipses et les arcs, l'épaisseur e ainsi définie est au-dessous des épaisseurs usuelles des voûtes en pierre. Elle l'est encore bien plus avec la formule $\frac{e_0}{\sqrt[3]{\cos\alpha}}$.

Plus loin, dans le calcul des moments d'inertie et centrifuges, on fera encore cette nouvelle hypothèse, que, pour chaque tranche, les rotations $\Delta\theta$ se font autour du centre de gravité et non d'un antipôle : c'est négliger les raccourcissements dus à l'effort normal devant les rotations dues au couple de flexion.

Grâce à toutes ces hypothèses, on calcule et on construit très vite les réactions des appuis dues aux charges, la ligne des intersections de ces réactions et leur enveloppe.

Sans doute, ce ne sont pas celles de la voûte réelle, mais elles les contrôlent fort utilement et garantissent des grosses erreurs, en particulier des erreurs d'échelle.

1. — Pont en béton armé de Langwies, ligne de Coire à Arosa (Suisse). Fibre moyenne de 100^m de portée, 42^m de montée, voisine d'une parabole. (*Schweizerische Bauzeitung — 22 novembre 1913*).

2. — Ces arcs ont été étudiés par Culmann « *Die graphische Statik* », 2e édition, Zurich, 1875, p. 598 et suivantes. Traduction française de MM. Glasser, Jacquier et Valat — Paris 1880, p. 553 et suivantes.

3. — III, p. 365 — Sur une fibre moyenne en parabole, funiculaire des charges, la ligne de charge est une parabole.

4. — III, p. 344, 346.

CHAPITRE II

ARC PARABOLIQUE DISSYMÉTRIQUE (Pl. V).

§ 1. — *ELLIPSE ÉLASTIQUE*

Art. 1. — Poids élastiques.

φ (poids élastique d'une tranche ds) $= \dfrac{ds}{EI} = \dfrac{dx}{EI_0}$

$\overset{B}{\underset{A}{\Phi}}$ (somme des poids élastiques de l'arc) $= \displaystyle\int_0^L \varphi = \frac{L}{EI_0}$

Art. 2. — Centre élastique $\mathcal{G}$.

$$X_{\mathcal{G}} \overset{B}{\underset{A}{\Phi}} = \int_0^L \varphi X = \frac{1}{EI_0}\int_0^L X\,dX = \frac{L^2}{2EI_0} \qquad X_{\mathcal{G}} = \frac{L}{2}.$$

$$Y_{\mathcal{G}} \overset{B}{\underset{A}{\Phi}} = \int_0^L \varphi Y = \frac{1}{EI_0}\int_0^L \frac{b}{a^2}\,X\,(2a - X)\,dX = \frac{b}{3EI_0a^2}(3a - L)\,L^2$$

$$Y_{\mathcal{G}} = O\mathcal{G} = \frac{b\,(3a - L)\,L}{3a^2} \qquad O'\mathcal{G} = O\mathcal{G} - OO' = \frac{bL^2}{6a^2} = \frac{2}{3}\,b'$$

Le centre élastique est sur la verticale OC du milieu de AB', à $\dfrac{b'}{3}$ au-dessous de C.

Art. 3. — Diamètre conjugué à la verticale $\mathcal{G}y$.

A. — Moment d'inertie des φ par rapport à $\mathcal{G}y$.

$$I_{y'} = I_{Y'} - \overset{B}{\underset{A}{\Phi}} X^2_{\mathcal{G}} \;[5]\; = \int_0^L X^2\varphi - \frac{L^3}{4EI_0} = \frac{L^3}{12EI_0} = j_y^2\,\overset{B}{\underset{A}{\Phi}}, \qquad j_y^2 = \frac{L^2}{12}$$

Par rapport à $\mathcal{G}y$, le rayon de gyration est celui d'un rectangle de longueur L.

B. — Direction $\mathcal{G}x'$ conjuguée à la verticale $\mathcal{G}y$.

C'est la droite qui passe par $\mathcal{G}$ et par l'antipôle d'une verticale quelconque, par exemple l'antipôle $\pi\,(\xi, \eta)$ de AY.

$$\overset{B}{\underset{A}{\Phi}} X_{\mathcal{G}}\,\xi_Y = I_{Y'} \;[6] \qquad \xi_Y = \frac{2}{3}\,L \qquad \xi_y = \xi_Y - \frac{L}{2} = \frac{L}{6}$$

$$\overset{B}{\underset{A}{\Phi}} X_{\mathcal{G}}\,\eta_X = I_{XY} = \frac{1}{EI_0}\,\frac{b}{a^2}\int_0^L X^2\,(2a - X)\,dX = \frac{bL^3\,(8a - 3L)}{12\,EI_0a^2}$$

$$\eta_X = \frac{bL\,(8a - 3L)}{6a^2} \qquad \eta_x = \eta_X - Y_{\mathcal{G}} = \frac{bL\,(2a - L)}{6a^2} = \frac{Y_1}{6} \quad \left(\begin{array}{c}Y_1 \text{ ordonnée}\\ BB' \text{ de l'appui B}\end{array}\right)$$

$$\text{Tang}\,\gamma = \frac{\eta_x}{\frac{L}{6}} = \frac{b\,(2a - L)}{a^2} = \frac{Y_1}{L}$$

$\mathcal{G}x'$ conjugué à $\mathcal{G}y$ est parallèle à la corde AB, à $\dfrac{b'}{3}$ au-dessous de C.

C. — Longueur de l'axe a″ conjugué à la verticale.

$$a''^2 \cos^2\gamma = j_y^2 = \frac{L^2}{12} \qquad a'' \cos\gamma = j_y = \frac{L\sqrt{3}}{6}$$

Art. 4. — Axe vertical b''

A. — Moment d'inertie des φ par rapport à $\mathcal{G}x'$.

$$I_{x''} = \int_0^L \varphi y'^2 = \frac{1}{EI_0}\int_0^L y'^2 dx \qquad y' = Y - Y_{\mathcal{G}} - (X - X_{\mathcal{G}})\,\text{tang}\,\gamma$$

On a donné plus haut Y en X, $Y_{\mathcal{G}}$, $X_{\mathcal{G}}$, tang γ : on trouve

$$I_{x''} = \frac{b^2\,L^5}{180\,EI_0a^4}$$

5. — p. 121. 6. — p. 122.

B. — Axe vertical b″ *conjugué à a″.*

$$\Phi b''^2 = I_{x''^2}$$

$$b''^2 = \frac{b^2 L^4}{180 a^4} \qquad b'' = \frac{b L^2}{6a^2\sqrt{5}} = \frac{2b'\sqrt{5}}{15} \quad 7$$

Art. 5. — Intersections de l'ellipse élastique et de la fibre moyenne.

Le diamètre $\mathcal{G}x'$, $Y = \frac{b L^2}{6a^2} + X \text{ tang.}\gamma$ coupe la fibre moyenne aux points :

$$X = \frac{L}{2} \pm \frac{L\sqrt{3}}{6} = \frac{L}{2} \pm j_y$$

c'est-à-dire aux sommets de l'ellipse élastique sur l'axe $\mathcal{G}x'$.

§ 2. — *RÉACTIONS* R^B, R^A *DES APPUIS* B *ET* A *DUES A UNE CHARGE VERTICALE* V *A* v *DE L'APPUI* A

Art. 1. — Moment statique des φ par rapport à V. Funiculaire 1.

$$\mathfrak{M}_A^V(\varphi) = \int_0^v \varphi\,(v - X) = \frac{1}{EI_0}\int_0^v (v - X)\,dX = \frac{v^2}{2\,EI_0}$$

$$= Z_1^B \left(\text{ordonnée du funiculaire } \mathbf{1}, \overset{V}{\underset{A}{\Gamma}} \text{ de la Pl. I}\right) \times p' \left(\text{distance polaire de } \mathbf{1} = \overset{B}{\underset{A}{\Phi}} = \frac{L}{EI_0}\right)$$

$$Z_1^B = \frac{v^2}{2L}$$

De même :

$$\mathfrak{M}_V^B(\varphi) = \frac{1}{EI_0}\int_V^L (X - v)\,dX = \frac{1}{EI_0}\,\frac{(L - v)^2}{2} = Z_1^A\,p' \qquad Z_1^A = \frac{(L - v)^2}{2L}$$

Art. 2. — Moment centrifuge des φ par rapport à V et à $\mathcal{G}y$. Funiculaire 3.

$$\overset{V}{\underset{A}{I}}_{Vy} = \int_0^V \varphi\,(v - X)\,(X_{\mathcal{G}} - X) = \frac{v^2\,(3L - 2v)}{12 EI_0}$$

$$= Z_3^B \left(\text{ordonnée du funiculaire } \mathbf{3}, \overset{V}{\underset{A}{\Lambda}} \text{ de la Pl. II}\right) \times p' \left(\text{distance polaire de } \mathbf{1} = \frac{L}{EI_0}\right)$$

$$\times p''' \left(\text{distance polaire de } \mathbf{3} = \frac{L}{4}\right)$$

$$Z_3^B = \frac{v^2\,(3L - 2v)}{3L^2} \qquad Z_3^A = \frac{(L - v)^2\,(L + 2v)}{3L^2}$$

7. — Voici à titre de simple vérification, la direction des axes principaux :

$$I_{y^2}\ (\text{Art. } 3) = \frac{L^3}{12 EI_0}$$

$$I_{x^2} = I_{X^2} - \overset{B}{\underset{A}{\Phi}} Y_{\mathcal{G}}^2 = \int_0^L Y^2\varphi - \frac{L}{EI_0} Y_{\mathcal{G}}^2$$

$$= \frac{b^2}{EI_0\,a^4}\int_0^L X^2\,(2a - X)^2\,dx - \frac{L}{EI_0} Y_{\mathcal{G}}^2$$

$$= \frac{b^2 L^3}{45\,EI_0\,a^4}\left[4\,(2a - L)^2 + a\,(L - a)\right] = j_x^2\,\frac{L}{EI_0} \qquad \text{d'où } j_x$$

$$I_{xy} = I_{XY} - \Phi X_{\mathcal{G}} Y_{\mathcal{G}} = \frac{b L^3}{12\,EI_0\,a^2}\,(2a - L)$$

$$\text{Tang. } 2\alpha\ (\text{p. } 119) = \frac{2 I_{xy}}{I_{y^2} - I_{x^2}} = \frac{2b\,(2a - L)}{a^2 - \frac{4b^2}{15a^2}\left[4\,(2a - L)^2 + a\,(L - a)\right]}$$

courbe en S, symétrique par rapport à F

$$\overset{B}{\underset{A}{\mathrm{I}}}\, y^2 = \frac{L^3}{12\,EI_0} = \overset{B}{\underset{A}{\Lambda}}\, p'p''' = \overset{B}{\underset{A}{\Lambda}}\, \frac{L}{EI_0}\,\frac{L}{4} \qquad \overset{B}{\underset{A}{\Lambda}} = \frac{L}{3}$$

Art. 3. — Moment centrifuge des φ par rapport à V et à $\mathcal{G}x'$. Funiculaire 5.

$$\overset{V}{\underset{A}{\mathrm{I}}}{}_{vx'} = \int_0^V \varphi\,(v - X)\, y' \qquad y' = Y - Y_{\mathcal{G}} - \left(X - X_{\mathcal{G}}\right) \text{tang.}\, \gamma$$

On a donné plus haut Y en X, $Y_{\mathcal{G}}$, $X_{\mathcal{G}}$, tang. γ : on trouve

$$\overset{V}{\underset{A}{\mathrm{I}}}{}_{vx'} = \frac{bv^2\,(L - v)^2}{12\,EI_0\,a^2} = Z_5 \left(\text{ordonnée du funiculaire } \mathbf{5},\ \overset{V}{\underset{A}{\Psi}} \text{ de la Pl. II}\right)$$

$$\times\, p' \text{ (distance polaire de } \mathbf{2}) \times p^{V} \left(\text{distance polaire de } \mathbf{5},\ \overset{B}{\underset{A}{\Theta}} \text{ de la Pl. II}\right)$$

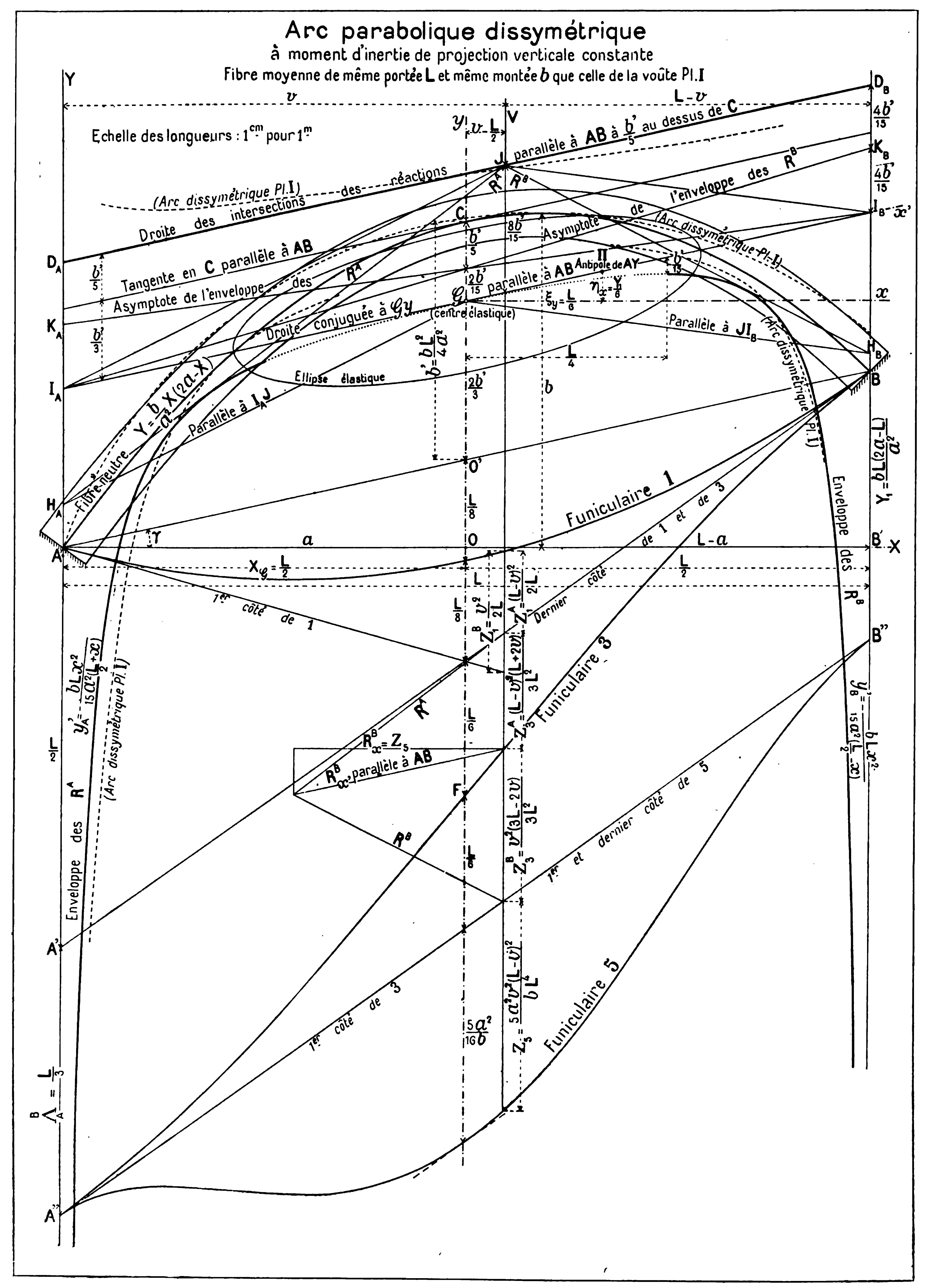
Or $$\overset{B}{\underset{A}{\mathrm{I}}}\, x'^2 = \frac{b^2 L^5}{180\,EI_0\,a^4} = \overset{B}{\underset{A}{\Theta}}\, p'p^{IV} \left(\text{distance polaire de } \mathbf{4} = \overset{B}{\underset{A}{\Lambda}} = \frac{L}{3}\right) = \overset{B}{\underset{A}{\Theta}}\, p''\, \frac{L}{3}$$

$$Z_5 = \frac{5\,a^2 v^2\,(L - v)^2}{bL^4}$$

courbe en chapeau de gendarme — même Z_5 à même distance de part et d'autre de $\mathcal{G}y$.

Art. 4. — Réactions des appuis.

	Appui B	Appui A
Moment de R par rapport au centre élastique $\frac{Rr}{V}$	$\dfrac{\overset{V}{\underset{A}{\mathfrak{M}}}(\varphi)}{\overset{B}{\underset{A}{\Sigma}}\varphi} = \dfrac{\frac{1}{EI_0}\,\frac{v^2}{2}}{\frac{L}{EI_0}} = \dfrac{v^2}{2L} = \overset{B}{Z_1}$	$\dfrac{\overset{B}{\underset{V}{\mathfrak{M}}}(\varphi)}{\overset{B}{\underset{A}{\Sigma}}\varphi} = \dfrac{\frac{1}{EI_0}\,\frac{(L - v)^2}{2}}{\frac{L}{EI_0}} = \dfrac{(L - v)^2}{2L} = \overset{A}{Z_1}$
Projection verticale de R $\frac{R_y}{V}$	$\dfrac{\overset{V}{\underset{A}{\mathrm{I}}}{}_{vy}}{\overset{B}{\underset{A}{\mathrm{I}}}{}_{y^2}} = \dfrac{\frac{v^2\,(3L - 2v)}{12\,EI_0}}{\frac{1}{EI_0}\,\frac{L^3}{12}} = \dfrac{v^2\,(3L - 2v)}{L^3} = \dfrac{\overset{B}{Z_3}}{\frac{L}{3}}$	$\dfrac{\overset{B}{\underset{V}{\mathrm{I}}}{}_{vy}}{\overset{B}{\underset{A}{\mathrm{I}}}{}_{y^2}} = \dfrac{\frac{(L - v)^2\,(L + 2v)}{12\,EI_0}}{\frac{1}{EI_0}\,\frac{L^3}{12}} = \dfrac{(L - v)^2\,(L + 2v)}{L^3} = \dfrac{\overset{A}{Z_3}}{\frac{L}{3}}$
Projection horizontale de R (poussée horizontale, la même pour les 2 appuis) $\frac{R_x}{V}$	$\dfrac{\overset{V}{\underset{A}{\mathrm{I}}}{}_{vx'}}{\overset{B}{\underset{A}{\mathrm{I}}}{}_{x'^2}} = \dfrac{\frac{bv^2\,(L - v)^2}{12\,EI_0\,a^2}}{\frac{b^2 L^5}{180\,EI_0\,a^4}} = \dfrac{15\,v^2\,(L - v)^2\,a^2}{bL^5} = \dfrac{Z_5}{\frac{L}{3}}$	
Projection horizontale de l'abscisse à l'origine sur $\mathcal{G}x'$ $m \cos\gamma = \frac{Rr}{R_y}$	$\dfrac{L^2}{2\,(3L - 2v)}$	$-\dfrac{L^2}{2\,(L + 2v)}$
Ordonnée à l'origine sur $\mathcal{G}y$ $n = \frac{Rr}{R_x}$	$\dfrac{bL^4}{30\,a^2\,(L - v)^2}$	$\dfrac{bL^4}{30\,a^2\,v^2}$
Equation de la ligne d'action de la réaction rapportée à $\mathcal{G}x'$, $\mathcal{G}y$.	$\dfrac{30\,a^2}{bL^2}\,(L - v)^2\, y' + 2\,(3L - 2v)\, x = L^2$	$\dfrac{30\,a^2}{bL^2}\, v^2 y' - 2\,(L + 2v)\, x = L^2$


Arc parabolique dissymétrique
à moment d'inertie de projection verticale constante
Fibre moyenne de même portée L et même montée b que celle de la voûte Pl. I
Echelle des longueurs : 1cm pour 1m
Droite des intersections des réactions
Tangente en C parallèle à AB
Asymptote de l'enveloppe des R^A
Asymptote de l'enveloppe des R^B
Droite conjuguée à Gy
(centre élastique)
Ellipse élastique
Parallèle à I_A J
Parallèle à JI_B
Fibre neutre
(Arc dissymétrique Pl. I)
Funiculaire 1
Funiculaire 3
Funiculaire 5
1er côté de 1
Dernier côté de 1 et de 3
1er côté de 3
1er et dernier côté de 5
Enveloppe des R^A
Enveloppe des R^B
R^B_x = Z_5
R^B_x parallèle à AB

Art. 5. — Ligne des intersections des réactions.

R^B, R^A coupent V au point d'ordonnée $y' = \frac{2bL^2}{15a^2} = \frac{8b'}{15}$, indépendant de v.

La ligne des intersections des réactions est une droite parallèle à $\mathcal{G}x'$ c'est-à-dire à AB, à $\frac{8b'}{15}$ au-dessus de $\mathcal{G}$, $\frac{b'}{5}$ au-dessus de C.

R^B rencontre D_BB au point H_B d'ordonnée $I_BH_B = -\frac{bL^3}{15a^2(L-v)}$.

Joignons JI_B, puis menons $\mathcal{G}H_B$ parallèle à JI_B

$$I_BH_B = D_BI_B \frac{\frac{L}{2}}{L-v} = \frac{bL^3}{15a^2(L \quad v)}$$

On a de même R^A en joignant JI_A et menant GH_A parallèle à JI_A.

On vérifie que R^A, R^B sont parallèles à celles qui résultent des funiculaires **3** et **5**.

On construit ainsi très facilement les réactions sans tracer leur enveloppe.

Art. 6. — Enveloppe des réactions.

Rapportée à $\mathcal{G}x'$, $\mathcal{G}y$, l'enveloppe des R^B est $y'_B = -\frac{bLx^2}{15a^2\left(\frac{L}{2}-x\right)}$, hyperbole passant par $\mathcal{G}$, tangente en $\mathcal{G}$ à $\mathcal{G}x'$; une asymptote est la verticale de l'appui B $\left(x = \frac{L}{2}\right)$; l'autre $y' = \frac{bL}{15a^2}\left(x + \frac{L}{2}\right)$ coupe $\mathcal{G}y$ à $\frac{bL^2}{30a^2} = \frac{2b'}{15}$ au-dessus de $\mathcal{G}$ et passe par I_A et par K_B milieu de D_BI_B.

On construit l'enveloppe en traçant quelques réactions comme l'indique l'article 5; elles la touchent au milieu du segment intercepté sur elles par les deux asymptotes.

L'enveloppe de R^A est l'hyperbole symétrique $y'_A = -\frac{bLx^2}{15a^2\left(\frac{L}{2}+x\right)}$ dont les asymptotes sont :

$$x = -\frac{L}{2} \qquad \text{et} \qquad y' = -\frac{bL}{15a^2}\left(x - \frac{L}{2}\right).$$

Quand V est sur l'appui A, la réaction R^B_0 (la première de l'appui B) laquelle est nulle, coupe $\mathcal{G}y$ à $\frac{bL^2}{30a^2} = \frac{2b'}{15}$ au-dessus de $\mathcal{G}$, $\mathcal{G}x'$ à $\frac{L}{6}$ à droite de $\mathcal{G}$. Elle touche l'enveloppe au point $x = \frac{L}{4}$, $y = -\frac{bL^2}{60a^2} = -\frac{b'}{15}$. La partie de l'enveloppe à gauche est parasite.

§ 3. — *COMPARAISON AVEC LA VOÛTE RÉELLE DE MÊME PORTÉE ET MÊME MONTÉE*

Sur la planche V on a tracé en traits discontinus les lignes construites pour la voûte réelle (Pl. I) : courbe des intersections des réactions, leur enveloppe.

CHAPITRE III

ARC PARABOLIQUE SYMÉTRIQUE DE PORTÉE $2a$ (Pl. VI)

(Dans les formules de l'arc dissymétrique, on fera L $= 2a$*)*

§ 1. — *ELLIPSE ÉLASTIQUE*

Art. 1. — Centre.

Il est sur l'axe vertical, au tiers de la montée b au-dessous de la clef.

Art. 2. — Longueur des axes.

$$a' \text{ (axe horizontal)} = \frac{a}{\sqrt{3}}$$

c'est celui d'un rectangle de longueur $2a'$

$$b'' \text{ (axe vertical)} = \frac{2b\sqrt{5}}{15}$$

Art. 3. — Intersections de l'ellipse élastique et de la fibre moyenne.

L'ellipse élastique $\dfrac{x^2}{\frac{a^2}{3}} + \dfrac{y^2}{\frac{4b^2}{45}} = 1$ coupe la fibre moyenne $y = b\left(\dfrac{1}{3} - \dfrac{x^2}{a^2}\right)$ aux points :

$$x = \pm\frac{a}{\sqrt{3}}, \quad y = 0 \quad \text{c'est-à-dire à ses deux sommets sur } \mathcal{G}x$$

$$x = \pm\frac{a}{\sqrt{15}}, \quad y = \frac{4b}{15}$$

§ 2. — *RÉACTIONS* R^B, R^A *DES APPUIS* B *ET* A *DUES A UNE CHARGE VERTICALE* V, *A* v *DE L'APPUI* A

Art. 1. — Moment statique des φ par rapport à V. Funiculaire 1.

Avec $p' = \overset{B}{\underset{A}{\Phi}} = \dfrac{2a}{EI_0}$, on a (p. 163, art. 1) :

$$Z_1^B = \frac{v^2}{4a^2}, \qquad Z_1^A = \frac{(2a - v)^2}{4a}$$

Art. 2. — Moment centrifuge des φ par rapport à V et à $\mathcal{G}y$. Funiculaire 3.

Avec $p''' = \dfrac{a}{2}$, soit $\overset{B}{\underset{A}{\Lambda}} = \dfrac{2a}{3}$, on a (p. 163, art. 2) :

$$Z_3^B = \frac{v^2(3a - v)}{6a^2} \qquad Z_3^A = \frac{(2a - v)^2(a + v)}{6a^2}$$

Art. 3. — Moment centrifuge des φ par rapport à V et à $\mathcal{G}x$. Funiculaire 5.

Avec $p^{IV} = \overset{B}{\underset{A}{\Lambda}} = \dfrac{2a}{3}$, $p^{V} = \overset{B}{\underset{A}{\Theta}}$, on trouve (p. 164, art. 3) :

$$Z_5 = \frac{5}{16}\,\frac{v^2(2a - v)^2}{a^2 b}$$

Art. 4. — Réactions R^A R^B (p. 164 art. 4).

	Appui B	Appui A
Moment de R par rapport au centre élastique $\frac{Rr}{V}$	$\frac{v^2}{4a} = Z_1^B$	$\frac{(2a-v)^2}{4a} = Z_1^A$
Projections de R — verticale $\frac{R_y}{V}$	$\frac{v^2(3a-v)}{4a^3} = \frac{Z_2^B}{\frac{2a}{3}}$	$\frac{(2a-v)^2(a+v)}{4a^3} = \frac{Z_2^A}{\frac{2a}{3}}$
Projections de R — horizontale $\frac{R_x}{V}$	$\frac{15v^2(2a-v)^2}{32ba^3} = \frac{Z_3}{\frac{2a}{3}}$	
Coordonnées à l'origine $\mathcal{G}$ — sur $\mathcal{G}x$ $m =$	$\frac{a^2}{3a-v)}$	$-\frac{a^2}{a+v}$
Coordonnées à l'origine $\mathcal{G}$ — sur $\mathcal{G}y$ $n =$	$\frac{8ba^2}{15(2a-v)^2}$	$\frac{8ba^2}{15v^2}$
Equation de la ligne d'action de R rapportée à $\mathcal{G}x$, $\mathcal{G}y$	$\frac{15}{8b}(2a-v)^2 y + (3a-v)x = a^2$	$\frac{15v^2}{8b}y - (a+v)x = a^2$

Art. 5. — Ligne des intersections des réactions.

R^A, R^B coupent V sur une horizontale à $\frac{8b}{15}$ au-dessus de $\mathcal{G}$, $\frac{b}{5}$ au-dessus de la clef.

R^B rencontre DB au point H_B d'ordonnée $y = \frac{8b}{15}\,\frac{a}{2a-v}$

Joignons J L, puis menons $\mathcal{G}H_B$ parallèle à JL $\quad LH = \frac{DL \times L\mathcal{G}}{DJ} = y$

On a de même R^A.

On construit ainsi très facilement R^B, R^A sans tracer leur enveloppe.

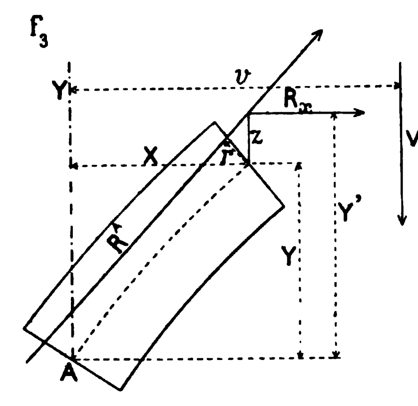
Art. 6. — Enveloppe des réactions.

L'enveloppe des R^B est l'hyperbole $\quad y_B = -\frac{2bx^2}{15a(a-x)}$

celle des R^A $\quad y_A = -\frac{2bx^2}{15a(a+x)}$

Mêmes observations que pour l'arc dissymétrique (p. 165 art. 6).

§ 3. — *MOMENT DE FLEXION* $\mathfrak{M}_F$ *DANS UNE SECTION A X DE L'APPUI DE GAUCHE DÛ A LA RÉACTION* R^A $(X < v)$ f₃



$\mathfrak{M}_F = R^A r = R_x z$ (distance verticale de la fibre neutre à R)

$$= V \frac{Z_s}{\frac{2a}{3}} \times z$$

On a sur l'épure Z_s et z : donc $\mathfrak{M}$.

On peut aussi calculer $\mathfrak{M}$

$$R_x = V \frac{15 v^2 (2a - v)^2}{32 a^3 b}$$

$$z = Y' - Y = \frac{2b}{15 v^2} \left[v (5v - 4a) + 4 (a + v) X \right] - \frac{bX}{a^2} (2a - X)$$

On trouve :

$$\mathfrak{M}_F = V \frac{(2a - v)^2}{32 a^3} \left[2a^2 v (5v - 4a) + 2 \left\{ (2a + v)^2 - 16 v^2 \right\} aX + 15 v^2 X^2 \right]$$

soient $X = 2a\alpha$ $\qquad v = 2a\beta$

$$\mathfrak{M}_F = 2a V (1 - \beta)^2 \left[\frac{\beta}{2} (5\beta - 2) + (1 + 2\beta - 15\beta^2) \alpha + 15 \beta^2 \alpha^2 \right]$$

$$= 2a V \gamma, \quad \gamma \text{ dépendant seulement de } \alpha \text{ et } \beta.$$

M. l'Ingénieur en Chef Mesnager a présenté à l'Académie des Sciences, le 9 Novembre 1914, un abaque très pratique donnant immédiatement γ en fonction de α et β [8].

§ 4. — *EFFET D'UN CHANGEMENT DE TEMPÉRATURE DE* $\tau°$

Une élévation de $\tau°$ augmente, un abaissement de $\tau°$ diminue la poussée de (p. 159) :

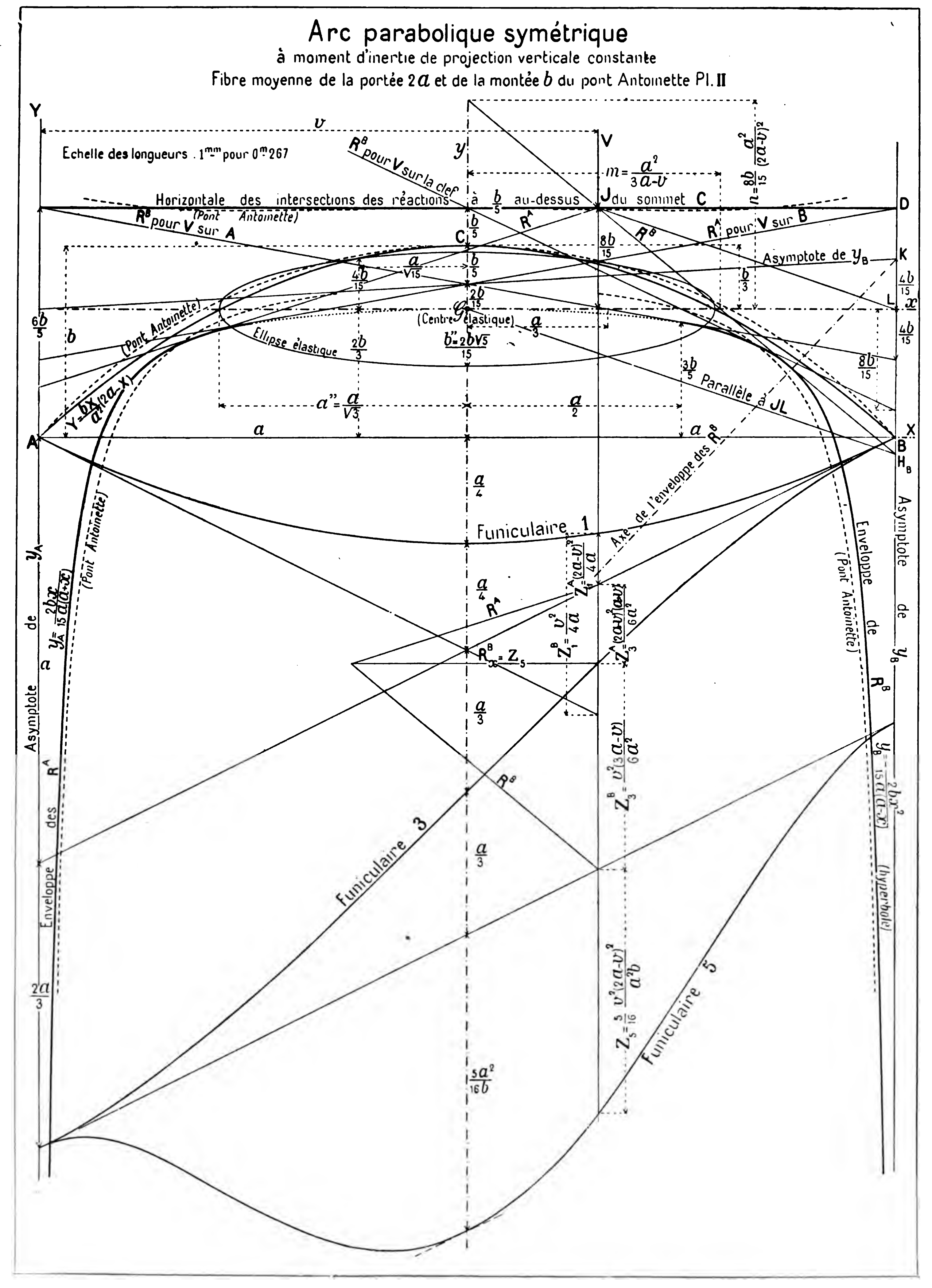
$$H_\tau \left(\begin{matrix} \text{effort en} \\ \text{tonnes} \end{matrix} \right) = \frac{2a \text{ (portée) } \alpha \tau}{\int_A^B I_{x^2} = \frac{1}{E \left(\text{tonnes} / \overline{0{,}01}^2\right) I_0} \; \frac{8ab^2}{45}} = \frac{45 \, E I_0 \, \alpha \tau}{4 b^2}$$

§ 5. — *COMPARAISON AVEC LA VOÛTE DU PONT ANTOINETTE* (Pl. II)

La fibre moyenne de la Pl. VI est une parabole ayant la portée et la montée de celles du pont Antoinette.

On a tracé en traits discontinus les lignes de la voûte réelle construites Pl. II, la courbe des intersections des réactions, leur enveloppe.

8. — Génie civil, 1er Décembre 1914, page 458 — 6 Février 1915, page 84.


Arc parabolique symétrique
à moment d'inertie de projection verticale constante
Fibre moyenne de la portée 2a et de la montée b du pont Antoinette Pl. II
Echelle des longueurs . 1mm pour 0m267
Horizontale des intersections des réactions à b/5 au-dessus du sommet C
(Pont Antoinette)
R^B pour V sur la clef
R^B pour V sur A
R^A pour V sur B
Asymptote de y_B
Ellipse élastique
(Centre élastique)
(Pont Antoinette)
Parallèle à JL
Axe de l'enveloppe des R^B
Funiculaire 1
Funiculaire 3
Funiculaire 5
Asymptote de y_A
Enveloppe des R^A
Enveloppe de R^B
(Pont Antoinette)
Asymptote de y_B
(hyperbole)

TITRE VI

LES APPUIS DE L'ARC NE SONT PAS INVARIABLES

§ 1. — *PRÉAMBULE*

Jusqu'ici on a supposé invariables les appuis de l'arc élastique ; s'ils ne le sont pas, les efforts calculés sont fort modifiés : par exemple,

si les appuis sont eux-mêmes élastiques (sol élastique, hautes culées élastiques, piles flexibles de hauts viaducs) ;

si les culées reculent, si les piles ou les culées s'enfoncent inégalement.

Je ne puis allonger encore cette longue étude ; je me bornerai à renvoyer aux auteurs qui ont traité ces cas.

§ 2. — *VOÛTES SUR PILES ÉLASTIQUES*

Les voûtes d'un ouvrage à plusieurs arches sont des arcs élastiques reposant sur des piles élastiques. Dans les calculs usuels, on suppose que chaque arche a ses retombées fixes ; c'est exact sous le poids mort pour des ouvrages en palier à arches égales. Mais une surcharge sur une arche l'abaisse, courbe ses 2 piles, d'autant plus flexibles qu'elles sont plus hautes, relève les arches voisines[1].

Le professeur W. Ritter a donné une méthode générale du calcul de l'arc élastique continu sur appuis élastiques, méthode élégante mais d'application fort laborieuse : elle a été exposée par M. Panetti[2], par M. Lossier[3].

M. le professeur Guidi l'applique en limitant la déformation due à une surcharge à l'arche chargée et ses deux voisines[4].

La méthode Ritter suppose que sous la surcharge, les sommets des piles s'écartent librement : ce n'est pas exact pour les ouvrages à tympans pleins, lesquels travaillent avec les voûtes[5].

1. — «..... les piles en maçonnerie ne sont pas inébranlables comme le suppose le calcul usuel, mais « fléchissent et pivotent en s'écartant de la travée chargée. Ces mouvements..... ont sur l'équilibre des « ponts à plusieurs arches une influence qu'il n'est pas permis de négliger, et telle qu'au pont du Manoir, « par exemple, un train entrant sur la première arche produit un relèvement sensible de la huitième. »
M. Rabut, *Comptes-rendus de l'Académie des Sciences, t. 159, p. 652. Séance du 9 novembre 1914.*

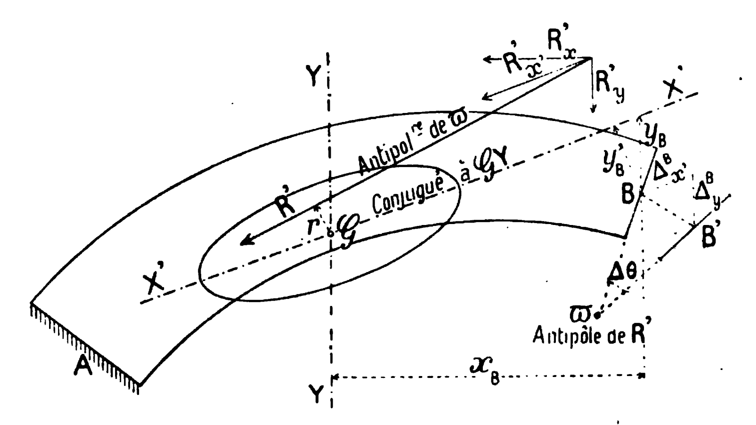
2. — « *Contributo alla trattazione grafica dell'arco continuo su appoggi elastici* ». (Turin 1901, chez Clausen).

3. — Génie civil, 3 janvier 1903, p. 153. — *Calcul des ponts en maçonnerie. Méthode de M. Ritter.*
15 août 1908, p. 268. — *Calcul des ponts en maçonnerie à plusieurs arches.*
La méthode Ritter y est simplifiée par deux hypothèses :
1° Les retombées des voûtes chargées se déplacent horizontalement, comme sous l'effet d'un changement de température ;
2° Les extrémités des voûtes adjacentes aux voûtes chargées sont fixes.

4. — *L'ellisse di elasticità nella scienza delle costruzioni* (Turin 1904).

5. — III, p. 358, D.

§ 3. — *RÉACTION DUE A UN MOUVEMENT NON ÉLASTIQUE DES APPUIS*



Imaginons que les appuis d'un arc AB aient reculé, se soient enfoncés inégalement dans le sol ; supposons fixe l'appui A ; B vient en B', tournant de $\Delta\theta$ autour de ϖ.

Cette rotation crée une réaction R' antipolaire de ϖ par rapport à l'ellipse élastique.

$$\Delta\theta = R' r \sum_A^B \varphi$$

M. Guidi [7] observe que $\mathcal{G}$ invariablement lié à l'appui B se déplace 1° de Δ_y^B suivant YY, de Δ_x^B, suivant X'X' ; 2° du fait de la rotation $\Delta\theta$, de $x_B \Delta\theta$ et $y'_B \Delta\theta$

Soient R'_y , R'_x les composantes de la réaction R'. On a (p. 130) :

$$R' r \sum_A^B \varphi = - \Delta\theta$$

$$R'_y \times I_{Y'} \left(\begin{matrix} \text{moment d'inertie} \\ \text{par rapport à } \mathcal{G}Y \end{matrix} \right) = x_B \Delta\theta - \Delta_y^B$$

$$R'_x \times I_{X'} \left(\begin{matrix} \text{moment d'inertie} \\ \text{par rapport à } \mathcal{G}X' \end{matrix} \right) = - \left(y'_B \Delta\theta - \Delta_{x'}^B \right)$$

Le funiculaire **3** donne $I_{Y'}$, le funiculaire **4**, $I_{X'}$:

On a R'_y , R'_x puis r.

6. — Ritter « *Anwendungen der graphischen statik* » 4e partie, p. 229. Zurich 1906.

7. — « *Contributo alla teoria degli archi elastici* ». Turin 1908.

3e PARTIE

TABLES

NUMÉRIQUES

FORMULES DE M. BAZIN

Soient, pour un cours d'eau ou un ouvrage d'art,

S la section mouillée en mètres carrés; P le périmètre mouillé en mètres;

R le rayon moyen en mètres de la section S, c'est-à-dire $\frac{S}{P}$;

i la pente en mètres par mètre aux abords de la section S;

u la vitesse moyenne en mètres par seconde de l'eau dans la section S, $u = \alpha\sqrt{i}$.

$$\alpha = \frac{\sqrt{R}}{0.0115\left(1 + \frac{\gamma}{\sqrt{R}}\right)} = \frac{R}{0.0115\,(\sqrt{R} + \gamma)} = \frac{86.9565\ R}{\sqrt{R} + \gamma}$$

Pour les ouvrages:
- $\gamma_1 = 0.06$ — ciment, bois raboté.
- $\gamma_2 = 0.16$ — plancher, briques, pierre de taille.
- $\gamma_3 = 0.46$ — mœllons.

Pour les cours d'eau:
- $\gamma_4 = 0.85$ — talus bien dressés ou perreyés.
- $\gamma_5 = 1.30$ — talus ordinaires.
- $\gamma_6 = 1.75$ — talus très rugueux.

Q le débit en mètres cubes qui traverse par seconde la section S, $Q = S\,u$.

Coefficients $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4, \alpha_5, \alpha_6$

R	Ouvrages d'art			Cours d'eau			R	Ouvrages d'art			Cours d'eau		
Rayon moyen	$\gamma_1=0.06$ α_1	$\gamma_2=0.16$ α_2	$\gamma_3=0.46$ α_3	$\gamma_4=0.85$ α_4	$\gamma_5=1.30$ α_5	$\gamma_6=1.75$ α_6	Rayon moyen	$\gamma_1=0.06$ α_1	$\gamma_2=0.16$ α_2	$\gamma_3=0.46$ α_3	$\gamma_4=0.85$ α_4	$\gamma_5=1.30$ α_5	$\gamma_6=1.75$ α_6
0m05	15.330	11.333	6.360	4.050	2.853	2.203	0m80	72.886	65.974	51.361	39.878	31.700	26.306
0.06	17.101	12.884	7.401	4.764	3.377	2.615	0.90	77.587	70.589	55.556	43.510	34.803	28.999
0.07	18.753	14.336	8.400	5.461	3.891	3.021	1.00	82.034	74.962	59.559	47.003	37.807	31.620
0.08	20.290	15.708	9.364	6.140	4.394	3.422	1.10	86.265	79.129	63.395	50.374	40.723	34.177
0.09	21.739	17.013	10.297	6.805	4.891	3.817	1.20	90.309	83.115	67.085	53.636	43.560	36.671
0.10	23.112	18.259	11.202	7.456	5.380	4.208	1.30	94.188	86.944	70.644	56.800	46.325	39.112
0.11	24.422	19.455	12.082	8.094	5.862	4.595	1.40	97.922	90.632	74.085	59.874	49.024	41.503
0.12	25.675	20.605	12.939	8.723	6.338	4.977	1.50	101.526	94.194	77.421	62.867	51.662	43.847
0.13	26.879	21.715	13.776	9.338	6.808	5.356	1.60	105.011	97.641	80.659	65.785	54.243	46.147
0.14	28.039	22.790	14.594	9.945	7.271	5.731	1.80	111.670	104.233	86.877	71.417	59.251	50.627
0.15	29.160	23.832	15.393	10.541	7.730	6.102	2.00	117.970	110.476	92.792	76.810	64.075	54.962
0.16	30.245	24.844	16.177	11.130	8.184	6.471	2.25	125.418	117.862	99.822	83.256	69.875	60.201
0.18	32.321	26.789	17.700	12.283	9.077	7.198	2.50	132.463	124.855	106.504	89.419	75.453	65.260
0.20	34.288	28.641	19.170	13.406	9.953	7.915	2.75	139.166	131.512	112.887	95.335	80.833	70.161
0.22	36.160	30.412	20.591	14.503	10.814	8.621	3.00	145.507	137.881	119.007	101.032	86.037	74.918
0.24	37.952	32.112	21.970	15.575	11.659	9.317	3.50	157.625	149.863	130.570	111.858	95.983	84.054
0.26	39.671	33.749	23.310	16.625	12.492	10.004	4.00	168.847	161.030	141.392	122.044	105.401	92.753
0.28	41.327	35.330	24.615	17.654	13.311	10.683	4.50	179.384	171.525	151.590	131.693	114.372	101.077
0.30	42.926	36.860	25.887	18.664	14.118	11.353	5.00	189.359	181.456	161.265	140.885	122.956	109.075
0.32	44.473	38.344	27.129	19.655	14.915	12.016	5.50	198.843	190.906	170.490	149.679	131.202	116.782
0.34	45.972	39.786	28.343	20.630	15.700	12.672	6.00	207.906	199.939	179.323	158.127	139.149	124.238
0.36	47.431	41.190	29.532	21.589	16.476	13.321	6.50	216.598	208.604	187.810	166.264	146.828	131.460
0.38	48.849	42.557	30.697	22.533	17.242	13.963	7.00	224.963	216.945	195.989	174.124	154.266	138.473
0.40	50.230	43.892	31.838	23.462	17.999	14.599	7.50	233.034	224.995	203.892	181.734	161.484	145.295
0.45	53.543	47.098	34.603	25.729	19.854	16.164	8.00	240.840	232.781	211.545	189.116	168.502	151.941
0.50	56.678	50.141	37.252	27.922	21.662	17.694	8.50	248.407	240.330	218.969	196.291	175.337	158.425
0.55	59.661	53.044	39.801	30.048	23.425	19.192	9.00	255.754	247.660	226.187	203.274	182.001	164.759
0.60	62.513	55.825	42.260	32.115	25.149	20.666	9.50	262.896	254.791	233.212	210.082	188.509	170.954
0.70	67.884	61.063	46.943	36.089	28.488	23.532	10.00	269.860	261.737	240.060	216.725	194.870	177.018

EXEMPLES :

	Ouverture	Pente i	Hauteur d'eau	$\sqrt{i}$	R	$\frac{u}{\sqrt{i}} =$	u	Q
Buse.....	0m60	0m005	0m30	0.071	0m15	$\alpha_1 = 29.2$	2m073	0mc293
Aqueduc.	1m	0m05 *(Radier)*	0m50	0.224	0m25	$\alpha_2 = \frac{21.97 + 23.31}{2} = 22.64$	5m071	2mc54

ÉPAISSEUR A LA CLEF

VOÛTES INARTICULÉES EN PLEIN CINTRE DE PORTÉE 2a

$$e_0 = \alpha\,(1 + \sqrt{2a})$$ (Tome III, p. 343)

Valeurs de e_0 pour 2a variant de 0^m60 à 100^m et α de 0.10 à 0.25

(1). — *Bonnes moyennes.* — Ponts : sous route, **0.15** ; sous voie étroite, **0.17** ; sous voie normale, **0.19**.

(Les accolades placées au-dessus des colonnes renvoient au renvoi (1) : Ponts sous route, colonne 0.15 ; Ponts sous voie étroite, colonne 0.17 ; Ponts sous voie normale, colonne 0.19.)

Portée 2a	Valeurs de e_0 pour α = 0.10	0.11	0.12	0.13	0.14	0.15	0.16	0.17	0.18	0.19	0.20	0.21	0.22	0.23	0.24	0.25
0^m60	0^m18	0^m20	0^m21	0^m23	0^m25	0^m27	0^m28	0^m30	0^m32	0^m34	0^m36	0^m37	0^m39	0^m41	0^m43	0^m44
0.70	0.18	0.20	0.22	0.24	0.26	0.28	0.29	0.31	0.33	0.35	0.37	0.39	0.40	0.42	0.44	0.46
1	0.20	0.22	0.24	0.26	0.28	0.30	0.32	0.34	0.36	0.38	0.40	0.42	0.44	0.46	0.48	0.50
1.50	0.22	0.24	0.27	0.29	0.31	0.33	0.36	0.38	0.40	0.42	0.44	0.47	0.49	0.51	0.53	0.56
2	0.24	0.27	0.29	0.31	0.34	0.36	0.39	0.41	0.43	0.46	0.48	0.51	0.53	0.56	0.58	0.60
2.50	0.26	0.28	0.31	0.34	0.36	0.39	0.41	0.44	0.46	0.49	0.52	0.54	0.57	0.59	0.62	0.65
3	0.27	0.30	0.33	0.36	0.38	0.41	0.44	0.46	0.49	0.52	0.55	0.57	0.60	0.63	0.66	0.68
4	0.30	0.33	0.36	0.39	0.42	0.45	0.48	0.51	0.54	0.57	0.60	0.63	0.66	0.69	0.72	0.75
5	0.32	0.36	0.39	0.42	0.45	0.49	0.52	0.55	0.58	0.61	0.65	0.68	0.71	0.74	0.78	0.81
6	0.34	0.38	0.41	0.45	0.48	0.52	0.55	0.59	0.62	0.66	0.69	0.72	0.76	0.79	0.83	0.86
7	0.36	0.40	0.44	0.47	0.51	0.55	0.58	0.62	0.66	0.69	0.73	0.77	0.80	0.84	0.87	0.91
8	0.38	0.42	0.46	0.50	0.54	0.57	0.61	0.65	0.69	0.73	0.77	0.80	0.84	0.88	0.92	0.96
9	0.40	0.44	0.48	0.52	0.56	0.60	0.64	0.68	0.72	0.76	0.80	0.84	0.88	0.92	0.96	1.00
10^m	0.42	0.46	0.50	0.54	0.58	0.62	0.67	0.71	0.75	0.79	0.83	0.87	0.92	0.96	1.00	1.04
11	0.43	0.47	0.52	0.56	0.60	0.65	0.69	0.73	0.78	0.82	0.86	0.91	0.95	0.99	1.04	1.08
12	0.45	0.49	0.54	0.58	0.62	0.67	0.71	0.76	0.80	0.85	0.89	0.94	0.98	1.03	1.07	1.12
13	0.46	0.51	0.55	0.60	0.64	0.69	0.74	0.78	0.83	0.88	0.92	0.97	1.01	1.06	1.11	1.15
14	0.47	0.52	0.57	0.62	0.66	0.71	0.76	0.81	0.85	0.90	0.95	1.00	1.04	1.09	1.14	1.19
15	0.49	0.54	0.58	0.63	0.68	0.73	0.78	0.83	0.88	0.93	0.97	1.02	1.07	1.12	1.17	1.22
16	0.50	0.55	0.60	0.65	0.70	0.75	0.80	0.85	0.90	0.95	1.00	1.05	1.10	1.15	1.20	1.25
17	0.51	0.56	0.61	0.67	0.72	0.77	0.82	0.87	0.92	0.97	1.02	1.08	1.13	1.18	1.23	1.28
18	0.52	0.58	0.63	0.68	0.73	0.79	0.84	0.89	0.94	1.00	1.05	1.10	1.15	1.21	1.26	1.31
19	0.54	0.59	0.64	0.70	0.75	0.80	0.86	0.91	0.96	1.02	1.07	1.13	1.18	1.23	1.29	1.34
20	0.55	0.60	0.66	0.71	0.77	0.82	0.88	0.93	0.98	1.04	1.09	1.15	1.20	1.26	1.31	1.37

Portée 2a	Valeurs de e_0 pour α = 0.10	0.11	0.12	0.13	0.14	0.15	0.16	0.17	0.18	0.19	0.20	0.21	0.22	0.23	0.24	0.25
21^m	0^m56	0^m61	0^m67	0^m73	0^m78	0^m84	0^m89	0^m95	1^m00	1^m06	1^m12	1^m17	1^m23	1^m28	1^m34	1^m40
22	0.57	0.63	0.68	0.74	0.80	0.85	0.91	0.97	1.02	1.08	1.14	1.19	1.25	1.31	1.37	1.42
23	0.58	0.64	0.70	0.75	0.81	0.87	0.93	0.99	1.04	1.10	1.16	1.22	1.28	1.33	1.39	1.45
24	0.59	0.65	0.71	0.77	0.83	0.88	0.94	1.00	1.06	1.12	1.18	1.24	1.30	1.36	1.42	1.47
25	0.60	0.66	0.72	0.78	0.84	0.90	0.96	1.02	1.08	1.14	1.20	1.26	1.32	1.48	1.44	1.50
26	0.61	0.67	0.73	0.79	0.85	0.91	0.98	1.04	1.10	1.16	1.22	1.28	1.34	1.40	1.46	1.52
27	0.62	0.68	0.74	0.81	0.87	0.93	0.99	1.05	1.12	1.18	1.24	1.30	1.36	1.43	1.49	1.55
28	0.63	0.69	0.75	0.82	0.88	0.94	1.01	1.07	1.13	1.20	1.26	1.32	1.38	1.45	1.51	1.57
29	0.64	0.70	0.77	0.83	0.89	0.96	1.02	1.09	1.15	1.21	1.28	1.34	1.40	1.47	1.53	1.60
30	0.65	0.71	0.78	0.84	0.91	0.97	1.04	1.10	1.17	1.23	1.30	1.36	1.42	1.49	1.55	1.62
31	0.66	0.72	0.79	0.85	0.92	0.99	1.05	1.12	1.18	1.25	1.31	1.38	1.44	1.51	1.58	1.64
32	0.67	0.73	0.80	0.87	0.93	1.00	1.07	1.13	1.20	1.26	1.33	1.40	1.46	1.53	1.60	1.66
33	0.67	0.74	0.81	0.88	0.94	1.01	1.08	1.15	1.21	1.28	1.35	1.42	1.48	1.55	1.62	1.69
34	0.68	0.75	0.82	0.89	0.96	1.02	1.09	1.16	1.23	1.30	1.37	1.43	1.50	1.57	1.64	1.71
35	0.69	0.76	0.83	0.90	0.97	1.04	1.11	1.18	1.24	1.31	1.38	1.45	1.52	1.59	1.66	1.73
36	0.70	0.77	0.84	0.91	0.98	1.05	1.12	1.19	1.26	1.33	1.40	1.47	1.54	1.61	1.68	1.75
37	0.71	0.78	0.85	0.92	0.99	1.06	1.13	1.20	1.27	1.35	1.42	1.49	1.56	1.63	1.70	1.77
38	0.72	0.79	0.86	0.93	1.00	1.07	1.15	1.22	1.29	1.36	1.43	1.50	1.58	1.65	1.72	1.79
39	0.72	0.80	0.87	0.94	1.01	1.09	1.16	1.23	1.30	1.38	1.45	1.52	1.59	1.67	1.74	1.81
40	0.73	0.81	0.88	0.95	1.03	1.10	1.17	1.25	1.32	1.39	1.46	1.54	1.61	1.68	1.76	1.83
41	0.74	0.81	0.89	0.96	1.04	1.11	1.18	1.26	1.33	1.41	1.48	1.55	1.63	1.70	1.78	1.85
42	0.75	0.82	0.90	0.97	1.05	1.12	1.20	1.27	1.35	1.42	1.50	1.57	1.65	1.72	1.80	1.87
43	0.76	0.83	0.91	0.98	1.06	1.13	1.21	1.28	1.36	1.44	1.51	1.59	1.66	1.74	1.81	1.89
44	0.76	0.84	0.92	0.99	1.07	1.14	1.22	1.30	1.37	1.45	1.53	1.60	1.68	1.76	1.83	1.91

Ponts (1) sous route — Ponts sous (1) voie étroite — Ponts sous voie (1) normale

Valeurs de e_0 pour $\alpha =$

Portée 2a	0.10	0.11	0.12	0.13	0.14	0.15	0.16	0.17	0.18	0.19	0.20	0.21	0.22	0.23	0.24	0.25
45m	0m77	0m85	0m92	1m00	1m08	1m16	1m23	1m31	1m39	1m46	1m54	1m62	1m70	1m77	1m85	1m93
46	0.78	0.86	0.93	1.01	1.09	1.17	1.25	1.32	1.40	1.48	1.56	1.63	1.71	1.79	1.87	1.95
47	0.79	0.86	0.94	1.02	1.10	1.18	1.26	1.34	1.41	1.49	1.57	1.65	1.73	1.81	1.89	1.96
48	0.79	0.87	0.95	1.03	1.11	1.19	1.27	1.35	1.43	1.51	1.59	1.66	1.74	1.82	1.90	1.98
49	0.80	0.88	0.96	1.04	1.12	1.20	1.28	1.36	1.44	1.52	1.60	1.68	1.76	1.84	1.92	2.00
50	0.81	0.89	0.97	1.05	1.13	1.21	1.29	1.37	1.45	1.53	1.61	1.69	1.78	1.86	1.94	2.02
51	0.81	0.90	0.98	1.06	1.14	1.22	1.30	1.38	1.47	1.55	1.63	1.71	1.79	1.87	1.95	2.04
52	0.82	0.90	0.99	1.07	1.15	1.23	1.31	1.40	1.48	1.56	1.64	1.72	1.81	1.89	1.97	2.05
53	0.83	0.91	0.99	1.08	1.16	1.24	1.32	1.41	1.49	1.57	1.66	1.74	1.82	1.90	1.99	2.07
54	0.83	0.92	1.00	1.09	1.17	1.25	1.34	1.42	1.50	1.59	1.67	1.75	1.83	1.92	2.00	2.09
55	0.84	0.93	1.01	1.09	1.18	1.26	1.35	1.43	1.51	1.60	1.68	1.77	1.85	1.94	2.02	2.10
56	0.85	0.93	1.02	1.10	1.19	1.27	1.36	1.44	1.53	1.61	1.70	1.78	1.87	1.95	2.04	2.12
57	0.85	0.94	1.03	1.11	1.20	1.28	1.37	1.45	1.54	1.62	1.71	1.80	1.88	1.97	2.05	2.14
58	0.86	0.95	1.03	1.12	1.21	1.29	1.38	1.46	1.55	1.64	1.72	1.81	1.90	1.98	2.07	2.15
59	0.87	0.95	1.04	1.13	1.22	1.30	1.39	1.48	1.56	1.65	1.74	1.82	1.91	2.00	2.08	2.17
60	0.87	0.96	1.05	1.14	1.22	1.31	1.40	1.49	1.57	1.66	1.75	1.84	1.92	2.01	2.10	2.19
61	0.88	0.97	1.06	1.15	1.23	1.32	1.41	1.50	1.59	1.67	1.76	1.85	1.94	2.03	2.11	2.20
62	0.89	0.98	1.06	1.15	1.24	1.33	1.42	1.51	1.60	1.69	1.77	1.86	1.95	2.04	2.13	2.22
63	0.89	0.98	1.07	1.16	1.25	1.34	1.43	1.52	1.61	1.70	1.79	1.88	1.97	2.06	2.14	2.23
64	0.90	0.99	1.08	1.17	1.26	1.35	1.44	1.53	1.62	1.71	1.80	1.89	1.98	2.07	2.16	2.25
65	0.91	1.00	1.09	1.18	1.27	1.36	1.45	1.54	1.63	1.72	1.81	1.90	1.99	2.08	2.17	2.27
66	0.91	1.00	1.09	1.19	1.28	1.37	1.46	1.55	1.64	1.73	1.82	1.92	2.01	2.10	2.19	2.28
67	0.92	1.01	1.10	1.19	1.29	1.38	1.47	1.56	1.65	1.75	1.84	1.93	2.02	2.11	2.20	2.30
68	0.92	1.02	1.11	1.20	1.29	1.39	1.48	1.57	1.66	1.76	1.85	1.94	2.03	2.13	2.22	2.31
69	0.93	1.02	1.12	1.21	1.30	1.40	1.49	1.58	1.68	1.77	1.86	1.95	2.05	2.14	2.23	2.33
70	0.94	1.03	1.12	1.22	1.31	1.40	1.50	1.59	1.69	1.78	1.87	1.97	2.06	2.15	2.25	2.34
71	0.94	1.04	1.13	1.23	1.32	1.41	1.51	1.60	1.70	1.79	1.89	1.98	2.07	2.17	2.26	2.36
72	0.95	1.04	1.14	1.23	1.33	1.42	1.52	1.61	1.71	1.80	1.90	1.99	2.09	2.18	2.28	2.37

Ponts (1) sous route — Ponts sous (1) voie étroite — Ponts sous voie (1) normale

Valeurs de e_0 pour $\alpha =$

Portée 2a	0.10	0.11	0.12	0.13	0.14	0.15	0.16	0.17	0.18	0.19	0.20	0.21	0.22	0.23	0.24	0.25
73m	0m95	1m05	1m14	1m24	1m34	1m43	1m53	1m62	1m72	1m81	1m91	2m00	2m10	2m20	2m29	2m39
74	0.96	1.06	1.15	1.25	1.34	1.44	1.54	1.63	1.73	1.82	1.92	2.02	2.11	2.21	2.30	2.40
75	0.97	1.06	1.16	1.26	1.35	1.45	1.55	1.64	1.74	1.84	1.93	2.03	2.13	2.22	2.32	2.42
76	0.97	1.07	1.17	1.26	1.36	1.46	1.55	1.65	1.75	1.85	1.94	2.04	2.14	2.24	2.33	2.43
77	0.98	1.08	1.17	1.27	1.37	1.47	1.56	1.66	1.76	1.86	1.96	2.05	2.15	2.25	2.35	2.44
78	0.98	1.08	1.18	1.28	1.38	1.47	1.57	1.67	1.77	1.87	1.97	2.06	2.16	2.26	2.36	2.46
79	0.99	1.09	1.19	1.29	1.38	1.48	1.58	1.68	1.78	1.88	1.98	2.08	2.18	2.27	2.37	2.47
80	0.99	1.09	1.19	1.29	1.39	1.49	1.59	1.69	1.79	1.89	1.99	2.09	2.19	2.29	2.39	2.49
81	1.00	1.10	1.20	1.30	1.40	1.50	1.60	1.70	1.80	1.90	2.00	2.10	2.20	2.30	2.40	2.50
82	1.00	1.11	1.21	1.31	1.41	1.51	1.61	1.71	1.81	1.91	2.01	2.11	2.21	2.31	2.41	2.51
83	1.01	1.11	1.21	1.31	1.42	1.52	1.62	1.72	1.82	1.92	2.02	2.12	2.22	2.33	2.43	2.53
84	1.02	1.12	1.22	1.32	1.42	1.52	1.63	1.73	1.83	1.93	2.03	2.13	2.24	2.34	2.44	2.54
85	1.02	1.12	1.23	1.33	1.43	1.53	1.64	1.74	1.84	1.94	2.04	2.15	2.25	2.35	2.45	2.55
86	1.03	1.13	1.23	1.34	1.44	1.54	1.64	1.75	1.85	1.95	2.05	2.16	2.26	2.36	2.47	2.57
87	1.03	1.14	1.24	1.34	1.45	1.55	1.65	1.76	1.86	1.96	2.07	2.17	2.27	2.38	2.48	2.58
88	1.04	1.14	1.25	1.35	1.45	1.56	1.66	1.76	1.87	1.97	2.08	2.18	2.28	2.39	2.49	2.60
89	1.04	1.15	1.25	1.36	1.46	1.57	1.67	1.77	1.88	1.98	2.09	2.19	2.30	2.40	2.50	2.61
90	1.05	1.15	1.26	1.36	1.47	1.57	1.68	1.78	1.89	1.99	2.10	2.20	2.31	2.41	2.52	2.62
91	1.05	1.16	1.26	1.37	1.48	1.58	1.69	1.79	1.90	2.00	2.11	2.21	2.32	2.42	2.53	2.63
92	1.06	1.17	1.27	1.38	1.48	1.59	1.69	1.80	1.91	2.01	2.12	2.22	2.33	2.44	2.54	2.65
93	1.06	1.17	1.28	1.38	1.49	1.60	1.70	1.81	1.92	2.02	2.13	2.24	2.34	2.45	2.55	2.66
94	1.07	1.18	1.28	1.39	1.50	1.60	1.71	1.82	1.93	2.03	2.14	2.25	2.35	2.46	2.57	2.67
95	1.07	1.18	1.29	1.40	1.50	1.61	1.72	1.83	1.93	2.04	2.15	2.26	2.36	2.47	2.58	2.69
96	1.08	1.19	1.30	1.40	1.51	1.62	1.73	1.84	1.94	2.05	2.16	2.27	2.38	2.48	2.59	2.70
97	1.08	1.19	1.30	1.41	1.52	1.63	1.74	1.84	1.95	2.06	2.17	2.28	2.39	2.50	2.60	2.71
98	1.09	1.20	1.31	1.42	1.53	1.63	1.74	1.85	1.96	2.07	2.18	2.29	2.40	2.51	2.62	2.72
99	1.09	1.20	1.31	1.42	1.53	1.64	1.75	1.86	1.97	2.08	2.19	2.30	2.41	2.52	2.63	2.74
100	1.10	1.21	1.32	1.43	1.54	1.65	1.76	1.87	1.98	2.09	2.20	2.31	2.42	2.53	2.64	2.75

TABLE T$_3$ — ÉPAISSEUR A LA CLEF

VOÛTES SURBAISSÉES EN ELLIPSE, EN ARC

Portée $2a$ Surbaissement σ

$$e'_0 = \alpha(1+\sqrt{2a})\,\mu = e_0 \left(\begin{array}{c}\text{Epaisseur à la clef}\\ \text{d'une voûte en plein cintre}\\ \text{de portée } 2a \text{ Table T}_1\end{array}\right) \times \mu$$ [1]

Valeurs de μ

σ	μ Ellipse	μ Arc
$0.50 = \frac{1}{2}$	1	1
0.49	1.0050	1.0001
0.48	1.0101	1.0005
0.47	1.0152	1.0012
0.46	1.0204	1.0021
0.45	1.0256	1.0033
0.44	1.0309	1.0046
0.43	1.0362	1.0065
0.42	1.0416	1.0085
0.41	1.0471	1.0108
$0.40 = \frac{1}{2.5}$	1.0526	1.0133
0.39	1.0582	1.0161
0.38	1.0638	1.0192
0.37	1.0695	1.0225
0.36	1.0748	1.0261
0.35	1.0810	1.0300
0.34	1.0869	1.0348
$0.3333 = \frac{1}{3}$	1.0909	1.0372
0.33	1.0928	1.0385
0.32	1.0989	1.0432

Arcs peu surbaissés (Arc, from 0.45)

σ	μ Ellipse	μ Arc
0.31	1.1049	1.0481
0.30	1.1111	1.0533
0.29	1.1173	1.0588
$0.2887 = \frac{1}{2\sqrt{3}}$	1.1181	1.0593
0.28	1.1235	1.0645
0.27	1.1299	1.0703
0.26	1.1363	1.0768
$0.25 = \frac{1}{4}$	1.1428	1.0833
0.24	1.1494	1.0901
0.23	1.1560	1.0972
0.22	1.1627	1.1045
0.21	1.1695	1.1121
$0.20 = \frac{1}{5}$	1 1764	1.1200
0.19	1.1834	1.1281
0.18	1.1904	1.1365
0.17	1.1976	1.1452
$0.1666 = \frac{1}{6}$	1.2000	1.1460
0.16	1.2048	1.1543
0.15	1.2121	1.1633

Arcs assez surbaissés (Arc, from 0.25)

σ	μ Ellipse	μ Arc
$0.1428 = \frac{1}{7}$	1.2170	1.1701
0.14	1.2195	1.1728
$0.1333 = \frac{1}{7{,}5}$	1.2244	1.1791
0.13	1.2269	1.1825
$0.125 = \frac{1}{8}$	1.2307	1.1874
0.12	»	1.1925
$0.1111 = \frac{1}{9}$	»	1.2014
0.11	»	1.2028
$0.10 = \frac{1}{10}$	»	1.2133
	»	1.2229
$0.091 = \frac{1}{11}$	»	1.2241
0.09	»	1.2314
$0.0833 = \frac{1}{12}$		

Arcs très surbaissés (Arc, from 0.14)

1. — $\mu \left(\begin{array}{c}\text{Tome III}\\ \text{p. 343}\end{array}\right) = \begin{cases} \text{Ellipses } \dfrac{4}{3+2\sigma} \\ \text{Arcs } \dfrac{4}{3}(1-\sigma+\sigma^2) \end{cases}$

TABLE T$_4$ — FRUIT MINIMUM φ A DONNER AU TYMPAN CONVEXE

DES PONTS OU VIADUCS EN COURBE DE RAYON R

POUR QU'AUCUN POINT DE L'INTRADOS DU BANDEAU NE SOIT EN PORTE-A-FAUX PAR RAPPORT A UN POINT PLUS BAS : MIN $\varphi = \frac{r}{R}$ (p. 89).

r est : pour un plein cintre et un arc de cercle, le *rayon de l'intrados* — ($2r$ est la *portée d'un plein cintre*) ; pour une ellipse, le *rayon de courbure au sommet*.

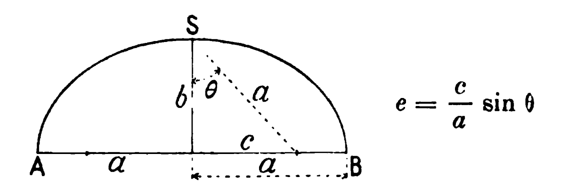
$2r$	Valeurs de φ pour R = 150m	200m	250m	300m	350m	400m	500m	600m	700m	800m	$2r$	Valeurs de φ pour R = 150m	200m	250m	300m	350m	400m	500m	600m	700m	800m
	m/m	m/m	m/m	m/m	m/m	m/m	m/m	m/m	m/m	m/m		m/m	m/m	m/m	m/m	m/m	m/m	m/m	m/m	m/m	m/m
4m	13.3	10.0	8.0	6.7	5.7	5.0	4.0	3.3	2.9	2.5	32m	106.7	80.0	64.0	53.3	45.7	40.0	32.0	26.7	22.9	20.0
5	16.7	12.5	10.0	8.3	7.1	6.3	5.0	4.2	3.6	3.1	33	110.0	82.5	66.0	55.0	47.1	41.3	33.0	27.5	23.6	20.6
6	20.0	15.0	12.0	10.0	8.6	7.5	6.0	5.0	4.3	3.8	34	113.3	85.0	68.0	56.7	48.6	42.5	34.0	28.3	24.3	21.3
7	23.3	17.5	14.0	11.7	10.0	8.8	7.0	5.8	5.0	4.4	35	116.7	87.5	70.0	58.3	50.0	43.8	35.0	29.2	25.0	21.9
8	26.7	20.0	16.0	13.3	11.4	10.0	8.0	6.7	5.7	5.0	36	120.0	90.0	72.0	60.0	51.4	45.0	36.0	30.0	25.7	22.5
9	30.0	22.5	18.0	15.0	12.8	11.3	9.0	7.5	6.4	5.6	37	123.3	92.5	74.0	61.7	52.8	46.3	37.0	30.8	26.4	23.1
10	33.3	25.0	20.0	16.7	14.2	12.5	10.0	8.3	7.1	6.3	38	126.7	95.0	76.0	63.3	54.2	47.5	38.0	31.7	27.1	23.8
11	36.7	27.5	22.0	18.3	15.7	13.8	11.0	9.2	7.9	6.9	39	130.0	97.5	78.0	65.0	55.7	48.8	39.0	32.5	27.9	24.4
12	40.0	30.0	24.0	20.0	17.1	15.0	12.0	10.0	8.6	7.5	40	133.3	100.0	80.0	66.7	57.1	50.0	40.0	33.3	28.6	25.0
13	43.3	32.5	26.0	21.7	18.6	16.3	13.0	10.8	9.3	8.1	41	136.7	102.5	82.0	68.3	58.6	51.3	41.0	34.2	29.3	25.6
14	46.7	35.0	28.0	23.3	20.0	17.5	14.0	11.7	10.0	8.8	42	140.0	105.0	84.0	70.0	60.0	52.5	42.0	35.0	30.0	26.3
15	50.0	37.5	30.0	25.0	21.4	18.8	15.0	12.5	10.7	9.4	43	143.3	107.5	86.0	71.7	61.4	53.8	43.0	35.8	30.7	26.9
16	53.3	40.0	32.0	26.7	22.8	20.0	16.0	13.3	11.4	10.0	44	146.7	110.0	88.0	73.3	62.8	55.0	44.0	36.7	31.4	27.5
17	56.7	42.5	34.0	28.3	24.2	21.3	17.0	14.2	12.1	10.6	45	150.0	112.5	90.0	75.0	64.2	56.3	45.0	37.5	32.1	28.1
18	60.0	45.0	36.0	30.0	25.7	22.5	18.0	15.0	12.9	11.3	46	153.3	115.0	92.0	76.7	65.7	57.5	46.0	38.3	32.9	28.8
19	63.3	47.5	38.0	31.7	27.1	23.8	19.0	15.8	13.6	11.9	47	156.7	117.5	94.0	78.3	67.1	58.8	47.0	39.2	33.6	29.4
20	66.7	50.0	40.0	33.3	28.6	25.0	20.0	16.7	14.3	12.5	48	160.0	120.0	96.0	80.0	68.6	60.0	48.0	40.0	34.3	30.0
21	70.0	52.5	42.0	35.0	30.0	26.3	21.0	17.5	15.0	13.1	49	163.3	122.5	98.0	81.7	70.0	61.3	49.0	40.8	35.0	30.6
22	73.3	55.0	44.0	36.7	31.4	27.5	22.0	18.3	15.7	13.8	50	166.7	125.0	100.0	83.3	71.4	62.5	50.0	41.7	35.7	31.3
23	76.7	57.5	46.0	38.3	32.8	28.8	23.0	19.2	16.4	14.4	51	170.0	127.5	102.0	85.0	72.8	63.8	51.0	42.5	36.4	31.9
24	80.0	60.0	48.0	40.0	34.2	30.0	24.0	20.0	17.1	15.0	52	173.3	130.0	104.0	86.7	74.2	65.0	52.0	43.3	37.1	32.5
25	83.3	62.5	50.0	41.7	35.7	31.3	25.0	20.8	17.9	15.6	53	176.7	132.5	106.0	88.3	75.7	66.3	53.0	44.2	37.9	33.1
26	86.7	65.0	52.0	43.3	37.1	32.5	26.0	21.7	18.6	16.3	54	180.0	135.0	108.0	90.0	77.1	67.5	54.0	45.0	38.6	33.8
27	90.0	67.5	54.0	45.0	38.6	33.8	27.0	22.5	19.3	16.9	55	183.3	137.5	110.0	91.7	78.6	68.8	55.0	45.8	39.3	34.4
28	93.3	70.0	56.0	46.7	40.0	35.0	28.0	23.3	20.0	17.5	56	186.7	140.0	112.0	93.3	80.0	70.0	56.0	46.7	40.0	35.0
29	96.7	72.5	58.0	48.3	41.4	36.3	29.0	24.2	20.7	18.1	57	190.0	142.5	114.0	95.0	81.4	71.3	57.0	47.5	40.7	35.6
30	100.0	75.0	60.0	50.0	42.8	37.5	30.0	25.0	21.4	18.8	58	193.3	145.0	116.0	96.7	82.8	72.5	58.0	48.3	41.4	36.3
31	103.3	77.5	62.0	51.7	44.2	38.8	31.0	25.8	22.1	19.4	60	200.0	150.0	120.0	100.0	85.7	75.0	60.0	50.0	42.9	37.5

TABLE T_5

DÉVELOPPEMENT ASB = L [1]

D'UNE ELLIPSE DE SURBAISSEMENT $\sigma = \frac{b}{2a}$

$\theta =$ Arc sin $\frac{c}{a}$	$\sigma = \frac{1}{2}\cos\theta$	Différences	$\frac{L}{2a}$	Différences
35°	0.409 576	5067	1.432 291	7531
36°	0.404 509	5191	1.424 760	7685
37°	0.399 318	5312	1.417 075	7835
38°	0.394 006	5433	1.409 240	7980
39°	0.388 573		1.401 260	
		5551		8120
40°	0.383 022	5667	1.393 140	8253
41°	0.377 355	5782	1.384 887	8383
42°	0.371 573	5896	1.376 504	8505
43°	0.365 677	6077	1.367 999	8622
44°	0.359 670		1.359 377	
		6117		8733
45°	0.353 553	6224	1.350 644	8838
46°	0.347 329	6330	1.341 806	8936
47°	0.340 999	6433	1.332 870	9028
48°	0.334 566	6536	1.323 842	9112
49°	0.328 030		1.314 730	
		6636		9191
50°	0.321 394	6734	1.305 539	9261
51°	0.314 660	6829	1.296 278	9324
52°	0.307 831	6923	1.286 954	9380
53°	0.300 908	7015	1.277 574	9427
54°	0.293 893		1.268 147	
		7105		9467
55°	0.286 788	7191	1.258 680	9498
56°	0.279 597	7277	1.249 182	9521
57°	0.272 320	7360	1.239 661	9534
58°	0.264 960	7441	1.230 127	9538
59°	0.257 519		1.220 589	
		7519		9533
60°	0.250 000	7595	1.211 056	9518
61°	0.242 405	7669	1.201 538	9492
62°	0.234 736	7741	1.192 046	9457
63°	0.226 995	7809	1.182 589	9410
64°	0.219 186		1.173 179	
		7877		9351
65°	0.211 309	7940	1.163 828	9281
66°	0.203 369	8003	1.154 547	9199
67°	0.195 366	8062	1.145 348	9104
68°	0.187 304	8120	1.136 244	8986
69°	0.179 184		1.127 250	
		8174		8872
70°	0.171 010	8226	1.118 378	8735
71°	0.162 784	8275	1.109 643	8581
72°	0.154 509	8323	1.101 062	8412
73°	0.146 186	8367	1.092 650	8225
74°	0.137 819		1.084 425	
		8409		8020
75°	0.129 410	8449	1.076 405	7795
76°	0.120 961		1.068 610	



$$e = \frac{c}{a}\sin\theta$$

L est aussi donné par la série :

$$L = \pi a \left\{ \begin{array}{l} 1 - \left(\frac{e}{2}\right)^2 - \frac{1}{3}\left(\frac{1\,.\,3}{2\,.\,4}e^2\right)^2 - \frac{1}{5}\left(\frac{1\,.\,3\,.\,5}{2\,.\,4\,.\,6}e^3\right)^2 - \cdots \\ - \frac{1}{2p-1}\left(\frac{1\,.\,3\,.\,5\ldots\ldots(2p-1)}{2\,.\,4\,.\,6\ldots\ldots\;2p}e^p\right)^2 - \ldots\ldots \end{array} \right\}$$

Elle est très lentement convergente :
on lui préfèrera la formule de Houël :

$$L = \pi\frac{a+b}{2}\left[\left\{1 + \frac{1}{8}\left(\frac{a-b}{a+b}\right)^2\right\}^2 + \frac{1}{256}\left(\frac{a-b}{a+b}\right)^6\right]$$

Application :

	Pont de Chalonnes	Pont de Marmande
$2a$	30m	36m
σ	$\frac{1}{4} = 0{,}25$	$\frac{1}{3{,}6} = 0{,}277\ 777$
L (Table T_5).......	36m332	44m885
L (Formule Houël).	36m331	44m884

1. — Extrait des tables de Legendre. « *Traité des fonctions elliptiques et des intégrales eulériennes.... par A. M. Legendre....* Paris — Imprimerie de Huzard-Courcier (1825-1826) 2e volume, page 291.

TABLE T₆. **Pression normale p en kilog. sur un mq de douelle de cintre, à une distance α de la clef**

$$p = \gamma c \left(1 + \frac{c}{2R}\right) \sqrt{\cos \frac{4}{3}\alpha}, \text{ ou, pour les grandes voûtes, } \gamma c \sqrt{\cos \frac{4}{3}\alpha}$$

γ, densité de la maçonnerie ; R, rayon de courbure de l'intrados ; c, épaisseur du rouleau à α de la clef

Distances angulaires à la clef α	$\log \sqrt{\cos \frac{4}{3}\alpha}$	$\text{colog} \sqrt{\cos \frac{4}{3}\alpha}$	$\sqrt{\cos \frac{4}{3}\alpha}$	$\frac{1}{\sqrt{\cos \frac{4}{3}\alpha}}$	Distances angulaires à la clef α	$\log \sqrt{\cos \frac{4}{3}\alpha}$	$\text{colog} \sqrt{\cos \frac{4}{3}\alpha}$	$\sqrt{\cos \frac{4}{3}\alpha}$	$\frac{1}{\sqrt{\cos \frac{4}{3}\alpha}}$
0°	0	0	1	1	35°	$\bar{1}$.918238	0.081762	0.828396	1.207152
1	$\bar{1}$.999941	0.000059	0.999864	1.000136	36	$\bar{1}$.912755	0.087245	0.818003	1.222489
2	$\bar{1}$.999764	0.000236	0.999457	1.000544	37	$\bar{1}$.907009	0.092991	0.807252	1.238771
3	$\bar{1}$.999470	0.000530	0.998780	1.001221	38	$\bar{1}$.900986	0.099014	0.796134	1.256071
4	$\bar{1}$.999058	0.000942	0.997834	1.002172	39	$\bar{1}$.894671	0.105329	0.784641	1.274468
5	$\bar{1}$.998526	0.001474	0.996612	1.003400	40	$\bar{1}$.888045	0.111955	0.772761	1.294062
6	$\bar{1}$.997876	0.002124	0.995121	1.004903	41	$\bar{1}$.881088	0.118912	0.760481	1.314958
7	$\bar{1}$.997106	0.002894	0.993359	1.006686	42	$\bar{1}$.873781	0.126219	0.747792	1.337270
8	$\bar{1}$.996215	0.003785	0.991323	1.008753	43	$\bar{1}$.866096	0.133904	0.734676	1.361144
9	$\bar{1}$.995202	0.004798	0.989013	1.011109	44	$\bar{1}$.858008	0.141992	0.721121	1.386730
10	$\bar{1}$.994066	0.005934	0.986429	1.013758	45	$\bar{1}$.849485	0.150515	0.707107	1.414214
11	$\bar{1}$.992806	0.007194	0.983571	1.016702	46	$\bar{1}$.840491	0.159509	0.692614	1.443807
12	$\bar{1}$.991421	0.008579	0.980440	1.019950	47	$\bar{1}$.830985	0.169015	0.677619	1.475757
13	$\bar{1}$.989908	0.010092	0.977030	1.023510	48	$\bar{1}$.820921	0.179079	0.662096	1.510355
14	$\bar{1}$.988266	0.011734	0.973343	1.027387	49	$\bar{1}$.810244	0.189756	0.646017	1.547947
15	$\bar{1}$.986493	0.013507	0.969378	1.031590	50	$\bar{1}$.798891	0.201109	0.629348	1.588952
16	$\bar{1}$.984586	0.015414	0.965131	1.036129	51	$\bar{1}$.786787	0.213213	0.612051	1.633854
17	$\bar{1}$.982545	0.017455	0.960605	1.041010	52	$\bar{1}$.773844	0.226156	0.594079	1.683278
18	$\bar{1}$.980365	0.019635	0.955795	1.046249	53	$\bar{1}$.759955	0.240045	0.575380	1.737980
19	$\bar{1}$.978044	0.021956	0.950701	1.051856	54	$\bar{1}$.744991	0.255009	0.555892	1.798908
20	$\bar{1}$.975579	0.024421	0.945319	1.057842	55	$\bar{1}$.728792	0.271208	0.535540	1.867274
21	$\bar{1}$.972967	0.027033	0.939652	1.064226	56	$\bar{1}$.711159	0.288841	0.514232	1.944648
22	$\bar{1}$.970204	0.029796	0.933693	1.071017	57	$\bar{1}$.691837	0.308163	0.491855	2.033121
23	$\bar{1}$.967287	0.032713	0.927442	1.078236	58	$\bar{1}$.670498	0.329502	0.468272	2.135512
24	$\bar{1}$.964210	0.035790	0.920895	1.085900	59	$\bar{1}$.646699	0.353301	0.443301	2.255802
25	$\bar{1}$.960970	0.039030	0.914030	1.094033	60	$\bar{1}$.619835	0.380165	0.416711	2.399753
26	$\bar{1}$.957561	0.042439	0.906904	1.102654	61	$\bar{1}$.589036	0.410964	0.388182	2.576107
27	$\bar{1}$.953979	0.046021	0.899454	1.111785	62	$\bar{1}$.552996	0.447004	0.357270	2.799007
28	$\bar{1}$.950216	0.049784	0.891694	1.121461	63	$\bar{1}$.509617	0.490383	0.323308	3.093028
29	$\bar{1}$.946268	0.053732	0.883625	1.131702	64	$\bar{1}$.455202	0.544798	0.285234	3.505887
30	$\bar{1}$.942127	0.057873	0.875240	1.142545	65	$\bar{1}$.382255	0.617745	0.241132	4.147105
31	$\bar{1}$.937785	0.062215	0.866533	1.154025	66	$\bar{1}$.271409	0.728591	0.186814	5.352923
32	$\bar{1}$.933235	0.066765	0.857502	1.166178	67	$\bar{1}$.032888	0.967112	0.107867	9.270681
33	$\bar{1}$.928467	0.071533	0.848139	1.179052	67°30	$-\infty$	$+\infty$	0	$+\infty$
34	$\bar{1}$.923472	0.076528	0.838440	1.192691					

TABLE T₇. — Compression moyenne β_m en kilog. à admettre par $\overline{0^m01}^2$ de section transversale d'une pièce de bois comprimée, pour un élancement $\varphi = \frac{\text{L (Longueur libre)}}{b \text{ (plus petit côté ou diamètre)}}$:

Pièces carrées ou rectangulaires $\beta_m = \dfrac{80}{1 + \left(\dfrac{\varphi}{24}\right)^2}$ Pieux ronds $\beta_m = \dfrac{60}{1 + \dfrac{1}{3}\left(\dfrac{\varphi}{12}\right)^2}$

φ	β_m Pièces carrées ou rectangulaires	β_m Pieux ronds	φ	β_m Pièces carrées ou rectangulaires	β_m Pieux ronds	φ	β_m Pièces carrées ou rectangulaires	β_m Pieux ronds	φ	β_m Pièces carrées ou rectangulaires	β_m Pieux ronds
0	80^{kg}00	60^{kg}00	13	61^{kg}85	43^{kg}13	26	36^{kg}80	23^{kg}39	39	21^{kg}97	13^{kg}27
1	79 86	59 86	14	59 69	41 27	27	35 31	22 33	40	21 18	12 76
2	79 45	59 45	15	57 53	39 45	28	33 88	21 32	41	20 42	12 27
3	78 77	58 78	16	55 38	37 67	29	32 52	20 36	42	19 69	11 80
4	77 84	57 86	17	53 27	35 95	30	31 22	19 46	43	19 00	11 36
5	76 67	56 72	18	51 20	34 29	31	29 98	18 61	44	18 34	10 95
6	75 29	55 38	19	49 18	32 69	32	28 80	17 80	45	17 72	10 55
7	73 73	53 89	20	47 21	31 15	33	27 68	17 04	46	17 12	10 17
8	72 00	52 26	21	45 31	29 69	34	26 61	16 32	47	16 55	9 81
9	70 14	50 53	22	43 47	28 30	35	25 59	15 64	48	16 00	9 47
10	68 17	48 72	23	41 70	26 97	36	24 61	15 00	49	15 48	9 15
11	66 11	46 87	24	40 00	25 71	37	23 69	14 39	50	14 98	8 84
12	64 00	45 00	25	38 36	24 52	38	22 81	13 82			

ANNEXES

PONTS A VOÛTES

INARTICULÉES OU ARTICULÉES

DE 40^{m} ET PLUS DE PORTÉE

ACHEVÉS APRÈS 1912

TABLEAUX SYNOPTIQUES

MONOGRAPHIES

PONT Date Symbole	PROJET — ENSEMBLE: *Longueur* *entre abouts des parapets* Déclivités Hauteur maxima du rail au-dessus du sol ou de l'étiage	ENSEMBLE: Largeurs entre parapets *entre tympans sous la plinthe* Fruit des tympans Revanche du rail sur l'extrados	GRANDE VOÛTE: INTRADOS Portée *Montée* *Rayon*	ÉPAISSEURS — CORPS Clef *à 60° de la clef*	ÉPAISSEURS — TÊTES Clef *à 60° de la clef*	MATÉRIAUX *Mortier* *Poids, pour 1mc de sable, de chaux ou de ciment*	PRESSIONS en $kg/\overline{0^m01^2}$ *Hypothèse adoptée* Surcharges supposées	1° ÉVIDEMEN[T] DES TYMPAN[S] 2° *DÉCORATIO[N] DES TÊTE[S]*
1	2	3	4	5	6	7	8	9
SOUS CHEMIN DE FER A VOIE NORMALE								
des **Eaux-Salées** *France* 1911-1914 C^l F^r ($\geqslant 40^m$)^4	*114^m83* 3^{mm} RG RD 31^m40	$8^m,075$ *8^m17* Fruit : 1/40 1^m085	$50^m,00$ *25^m00* *25^m00*	$1^m,60$ *3^m20*	$1^m,65$ *3^m25*	Bandeaux, douelle et queutage en MAV[1] de 0^m25 à 0^m27 Calcaire de Châteauneuf-lez-Martigues (Bouches-du-Rhône) Poids 2700^k Résistance 1300^k *Au-dessus du joint à 80° 46' de la clef : ciment artificiel Lafarge de Valdonne 611^k* *au-dessous : chaux « maritime » Lafarge 350^k* *Comme sable, calcaire broyé.*	Max. $\beta = 27^k$ *Arc élastique* *Méthode de M. Résal* Surcharge de 10^T par m. c[t] de voie Effort dû au freinage 10^T8	1° 10 voûtes transversal[es] vues, en plein cint[re] de 4^m90, sur piles de 1^m20 aux naissan[ces] 2° *Archivolt[e] de 0^m40 d'épaiss[eur] à la clef, 0^m65 aux re[ins], 0^m20 de sail[lie] uniforme s[ur] le bandea[u]*
SOUS CHEMIN DE FER A VOIE ÉTROITE								
sur la **Roizonne** *France* 1912-1915 C^l f^r ($\geqslant 40^m$)^2	*231^m52* 10^{mm} RD RG 110^m	entre parapets 5^m40 (chaussée de 4^m30) *entre tympans* *4^m50* *entre têtes de la grande voûte* *4^m70* fruit : 1/40 1^m40	$79^m,453$ *Montée* *(de la clef aux retombées)* RD *36^m83* RG *34^m21* *40^m00*	$1^m,65$ *2^m90*	$1^m,65$ *2^m90*	Bandeaux et douelle PT[1] Queutage au-dessus des joints à 60° de la clef gros MEV[1] au-dessous MOV[1] *Ciment artificiel Vicat 600^k*	Pressions avec surcharge MAX. / moy. Clef: 22^k3 / 22^k2 Joint à 60°: 40^k3 / 21^k5 *Arc élastique* *Méthode de M. Résal* 3750^k par m. c[t] soit 797^k par m. q.	1° 8 voûtes transversal[es] vues, en plein cint[re] de 6^m50, sur piles de 1^m30 aux naissan[ces] 2° •

1. Pour le sens de ces abréviations, voir Avertissement, Tome I, p. IV, n° 6.

PONTS A UNE SEULE GRANDE ARCHE

TABLEAU SYNOPTIQUE

…NDATIONS *…ture du sol* …rofondeur …us l'étiage …Pressions sur le sol kg/$\overline{0^{m}01}^2$ *Procédé*	EXÉCUTION — GRANDE VOÛTE — CINTRE — FERMES Type *Matière* Appareils de décintrement	FERMES Nombre *Épaisseur* Écartement d'axe en axe *Surhaussement*	Cube de bois Poids de fer Dépenses Totaux	Cube de bois Poids de fer Dépenses par mq de douelle [2]	MODE DE CONSTRUCTION	DÉCINTREMENT État d'avancement du pont *Temps entre le dernier clavage et le décintrement* Date	TASSEMENTS DE LA CLEF sur cintre t_c au décintrement t'_v après t''_v	CUBE DE MAÇONNERIE A MORTIER **Q** DÉPENSE **D** Totaux et par unité { de surface utile S_p [3] de volume « utile » W
10	11	12	13	14	15	16	17	18

SÉRIE C¹ Fʳ (⩾ 40ᵐ) *Suite du tableau synoptique Tome I p. 38*

10	11	12	13	14	15	16	17	18
Dolomie R D : …s haut que l'étiage *à sec* G : à 22ᵐ *par …isement en …ille blindée*	Fixe à rayons (Type Lavaur II p. 137) *Sapin* (*Dauphiné et Savoie*) Boîtes à sable	7 *de rive :* 20ᶜᵐ *interm.* 25ᶜᵐ 1ᵐ50 »	Bois en élévat. 454ᵐᶜ en fondat. 29.5 483.5ᵐᶜ 14263ᵏ 77033ᶠ	0ᵐᶜ78 0ᵐᶜ83 24ᵏ5 132ᶠ2	3 rouleaux au-dessus de 60° 9' 30" 1ᵉʳ rouleau 8 tronçons 15 clavages 2ᵉ 6 tronçons 7 clavages 3ᵉ 6 tronçons 5 clavages	Voûte nue *38 jours* 12 août	amont / aval t_c 29.2ᵐᵐ / 32.8ᵐᵐ t'_v 0.22 / 0.31 t''_v apr. 6 jʳˢ 0.25 / 0.17	Q = 11620ᵐᶜ Q : S_p = 12ᵐᶜ4 Q : W = 0ᵐᶜ67 **D = 998 209ᶠ** D : S_p = 1086ᶠ6 D : W = 58ᶠ D : Q = 85ᶠ9

SÉRIE C¹ fʳ (⩾ 40ᵐ) *Suite du tableau synoptique Tome I p. 52*

10	11	12	13	14	15	16	17	18
Calcaire …chisteux 12ᵏ …supposant …a charge …iformément …artie sur la …ombée de la …oûte et le …ssif qui la …bute)	Retroussé sur 63ᵐ60 (Type Luxembourg II p. 72ᵇⁱˢ) *Sapin du pays* Boîtes à sable	4 *cerveau* 23ᶜᵐ *chevalemᵗ* 39ᶜᵐ 1ᵐ60 *O*	250ᵐᶜ 94000ᵏ 70000ᶠ	0ᵐᶜ41 155ᵏ2 115ᶠ6	3 rouleaux Dans chaque rouleau, 6 tronçons clavés en même temps à la clef, aux reins, aux joints à 60° 1ᵉʳ rouleau 1 moellon Epaissseur moyenne 0ᵐ60 environ 2ᵉ rouleau 1 moellon au cerveau 2 moellons aux reins	Les piles des voûtes d'élégissement construites *41 jours* 7 septembre	t_c = 61ᵐᵐ t'_v = { 6ᵐᵐ (amᵗ) / 5ᵐᵐ (aval)	Q = 11950ᵐᶜ Q : S_p = 10ᵐᶜ64 Q : W = 0ᵐᶜ27 Q : W' = 0ᵐᶜ34 **D = 560000ᶠ** D : S_p = 498ᶠ7 D : W = 12ᶠ7 D : W' = 16ᶠ4 D : Q = 46ᶠ9 Cube de la grande voûte 1651ᵐᶜ *(Q, D, approximatifs : le décompte n'est pas arrêté)*

…ur le calcul de la surface de douelle, voir Avertissement, Tome I page V, n° 7 — *A*. 3. S_p = Longueur (col. 2) × Largeur entre parapets (col. 3) — C'est la surface offerte à la circula…
4. W = Surface vue de l'élévation × Largeur entre parapets. 5. W' = Surface de l'élévation au-dessus des fondations × Largeur entre parapets.
Pour S_p, W, W', voir Avertissement, Tome I, page V, n° 7 — *B*.

PONT Date Symbole *En quoi consiste l'ouvrage* 1	PROJET — ENSEMBLE *Longueur* *entre abouts des parapets* Déclivités Hauteur maxima de la chaussée ou du rail au-dessus du sol ou de l'étiage 2	Largeurs (entre parapets / *entre tympans* *sous la plinthe*) Fruit des tympans Revanche de la chaussée ou du rail sur l'extrados 3	GRANDES VOÛTES — INTRADOS Portée *Montée* Surbaissement *Rayons de courbure : à la clef, aux naissances* 4	ÉPAISSEURS — CORPS Clef *Milieu de la montée* 5	ÉPAISSEURS — TÊTES Clef *Reins* 6	MATÉRIAUX *Mortier* *Poids, pour 1mc de sable, de chaux ou de ciment* 7	PRESSIONS en kg/0m01² *Hypothèse adoptée* Surcharges supposées 8	1° ÉVIDEMENT DES TYMPANS 2° *DÉCORATION DES TÊTES* 9
EN DEUX ANNEAUX SOUS ROUTE								
de **l'Hôtel-Dieu à Lyon** *France* 1912-1916 $E^n E^n r^{te} (\geqslant 40^m)^2$ *4 arches en ellipse de 42m, 45m, 49m, 45m* *2 voûtes de décharge en ellipse* RD — *7m50* RG — *11m00*	*227m50* RD Parabole RG 11m79 (étiage)	20m,10 (chaussée de 11m) *Largeur : des anneaux en douelle, à la clef* *5m05* *du vide entre eux* *10m80* Pas de fruit 1m00	Ellipse 1 RD 42m,00 *7m77* $\frac{1}{5,405}$ = 0,185 *45m00* *3m50*	1m,25 *1m75*	1m,00 *1m75*	Bandeaux et douelle en PT[1] calcaire de Villette (Ain) Sable de Saône *Ciment artificiel Lafarge 600k*	Pressions MAX. clef 35k9 reins 39 6	1° Voûtes transversal[es] vues, en arc de cen[tre] de 2m00 à 1/5 sur piles de 0m70 2° »
			2 45m,00 *9m04* $\frac{1}{4,978}$ = 0,200 *45m00* *4m06*	1m,25 *1m475*	1m,00 *1m475*		clef 32k3 reins 40 9	
			3 49m,00 *9m54* $\frac{1}{5,136}$ = 0,195 *48m00* *4m00*	1m,25 *1m62*	1m,00 *1m62*		clef 33k reins 40	
			4 RG 45m,00 *9m04* $\frac{1}{4,978}$ = 0,200 *45m00* *4m00*	1m,25 *1m475*	1m,00 *1m475*		clef 32k3 reins 40 9 *Méthode de M. Résal* 600k par m. q.	
SOUS CHEMIN DE FER A VOIE NORMALE								
de **Courris** *France* 1912-1916 $E^n F^r (\geqslant 40^m)^2$ *3 voûtes égales*	*159m02* » 18m55	*4m50* *4m30* Pas de fruit 1m	Ellipse 40m,00 *16m25* $\frac{1}{2,461}$ = 0,406 *24m615* *13m203*	1m,30 *2m40* l'arc d'extrados est une ellipse concentrique	1m,30 *2m40*	Bandeaux et douelle MAV[1] Queutage : au-dessus du milieu de la montée MEV[1] au-dessous MOV[1] *Ciment 600k*	Pressions (MAX. / moy.) clef 15k7 (extr.) / 13k3 au 1/4 de la montée 19k5 (intr.) / 11k2 au milieu de la montée 10k8 (intr.) / 10k3 *Méthode de M. Résal* 1180k par m. q. de plate-forme sur toute la voûte	1° au-dessu[s] des reins d[es] 3 grandes v[oû] tes, 2 voû[tes] transversal[es] vues, en pl[ein] cintre de 3[m] sur piles d[e] 1m95 aux naissance[s] 2° »

1. — Pour le sens de ces abréviations, voir Avertissement, Tome I page IV, n° 6.

TABLEAU SYNOPTIQUE

FONDATIONS (col. 10)	EXÉCUTION — GRANDES VOÛTES — CINTRES — FERMES		Cube de bois, Poids de fer, Dépenses		MODE DE CONSTRUCTION	DÉCINTREMENT	TASSEMENTS DE LA CLEF	CUBE DE MAÇONNERIE A MORTIER Q — DÉPENSE D
...ture du sol Profondeur ...ous l'étiage Pressions sur le sol kg/ $0^{m}01^{2}$ *Procédé*	Type *Matière* Appareils de décintrement	Nombre *Épaisseur* Écartement d'axe en axe *Surhaussement*	Totaux	par mq de douelle [2]		État d'avancement du pont *Temps entre le dernier clavage et le décintrement* Date	sur cintre t_c au décintrement t'_v après t''_v	Totaux et par unité { de surface utile S_p [3] / de volume « utile » W [4]
10	11	12	13	14	15	16	17	18

SÉRIE E^n E^n r^te (⩾ 40^m) *Suite du tableau synoptique, Tome I, p. 190*

10	11	12	13	14	15	16	16 Anneau amont	16 Anneau aval	17 t'_v Anneau amont	17 t'_v Anneau aval	18
...os gravier et sable 10 à 12^m ...us l'étiage (6 à 10^m ...ns le sol) Pression maxima 12^k39 *...comprimé*	*Métal* Boîtes à sable dans des caissons en bois remplis de paraffine	4 » 1^m55 *15^mm à 25^mm*	372426^k		3 rouleaux aux reins 2 au cerveau 1er rouleau : 6 taquets, 4 assises à sec	1 RD					
						2 (3 étant clavée)	*43 j.* 17 mars	*27 j.* 27 avril	13.2^mm	8.^mm	
						3 (4 clav.)	*40 j.* 14 mai	*34 j.* 23 mai	2.4^mm	2.^mm	
						4 RG Voûte de décharge clavée	*33 j.* 19 juin	*38 j.* 12 juil.	1.4^mm	0.2^mm	

SÉRIE E^n F^r (⩾ 40^m) *Suite du tableau synoptique, Tome I, p. 222*

10	11	12	13	14	15	16	17	18
Rocher (schiste) 2^m30 *...isements ...ans un ...tardeau ...une pile*	Fixe type Antoinette *Sapin* Boites à sable	4 *25^cm* 1^m37 *30^mm*	81^mc13 3547^k 8344^f **Un seul cintre pour les 8 voûtes**	0^mc37 16^k3 38^f25	2 rouleaux 1er rouleau 11 clavages (coffrages, taquets, cales... comme aux ponts de Lavaur (II p. 139), Antoinette (II p. 147))	On a décintré le 1er rouleau : Voûte 3 *à 37 jours* 23 novembre Voûte 1 *à 30 jours* 20 mai Voûte 2 *à 43 jours* 10 septembre	t_c = 30^mm t'_v(1er anneau) Voûte { 3 — 14^mm / 1 — 12 / 2 — 9	

...le calcul de la surface de douelle, voir Avertissement, Tome I, page V, n° 7 — *A*. 3. S_p = Longueur (col. 2) × Largeur entre parapets (col. 3) — C'est la surface offerte à la circulation.
4. W = Surface vue de l'élévation × Largeur entre parapets. 5. W' = Surface de l'élévation au-dessus des fondations × Largeur entre parapets.
Pour S_p, W, W', voir Avertissement, Tome I, page V, n° 7 *B*.

PONT Date Symbole	PROJET — ENSEMBLE *Longueur* *entre abouts des parapets* Déclivités Hauteur maxima du rail au-dessus du sol ou de l'étiage	Largeurs entre parapets *entre tympans* *sous la plinthe* Fruit des tympans Revanche du rail sur l'extrados	GRANDE VOÛTE — INTRADOS Portée *Montée* Surbaissement *Rayons:* *cerveau* *reins*	ÉPAISSEURS — CORPS Clef *Retombées*	ÉPAISSEURS — TÊTES Clef *Retombées*	MATÉRIAUX *Mortier* *Poids, pour 1mc de sable, de chaux ou de ciment*	PRESSIONS en kg/$0^{m}01^2$ *Hypothèse adoptée* Surcharges supposées	1° ÉVIDEME[NT] DES TYMPA[NS] 2° *DÉCORATI[ON] DES TÊT[ES]*
1	2	3	4	5	6	7	8	9
SOUS CHEMIN DE FER A VOIE NORMALE								
de **Niagara** *Norvège* 1914-19.. A[1] Fr (⩾ 40m)[12]	*75m50* 7mm5 »	5m90 *5m30* Fruit $\frac{1}{30}$ 1m60	Arc d'anse de panier à 3 centres 42m,00 *13m00* $\frac{1}{3,23}$ = 0,31 *22m50* *24m818*	1m,60 *2m00*	1m,60 *2m00*	Bandeaux, Douelle PT[1] Granit 1420k à 1575k *Ciment 560k*	Pressions maxima : avec surch. / sans surch. Clef 17k / 11k6 Reins 28 / 17.5 Retomb 31.5 / 17 » 15T par mètre courant	1° Voûtes en plein ci[ntre] de 3m5[0] sur piles de 1[m]... 2° »
SOUS CHEMIN DE FER A VOIE ÉTROITE								
Sur la **Vouga** *Portugal* 1913 A[1] fr (⩾ 40m)[5]	*168m* 0 29m	3m60 *3m10* à la clef Fruit $\frac{1}{30}$ 0m90	Arc d'anse de panier à 3 centres au niveau des fondations 55m,70 *27m00* $\frac{1}{2,266}$ = 0.449 *24m70* *33m20*	1m,20 *à 6m au-dessus des fondations* *2m60*	1m,20 *2m60*	Bandeaux et douelle MEV[1] (granit) Queutage MOV[1] *Ciment 350k*	Pressions maxima [6] Clef / Reins à 52° et 20m90 de la clef / Retombées Charge permanente..... 15k / 23k / 14k Charge et surcharge: Sur toute la voûte 21 / 23 / 16 Sur la ½ voûte: Côté chargé 20 / 24 / 17 Côté non chargé 20 / 22 / 15 Celles du règlement français du 29 août 1891.	1° Voûtes en plein ci[ntre] de 10m.. sur piles de 1[m].. aux naissa[nces] 2° »
de **Pélussin** *France* 1914-1916 A[1] fr (⩾ 40m)[6]	*169m50* 30mm environ 58m50	entre parapets 4m *entre tympans* *2m90 à 3m00* *Entre bandeaux* *3m* Fruit : $\frac{1}{50}$ 0m805	Arc d'anse de panier à 3 centres 55m,00 *24m70* $\frac{1}{2.266}$ = 0.449 *24m70* *33m20*	1m,40 aux reins 2m10 *3m80*	1m,40 aux reins 2m10 *3m80*	Bandeaux et douelle MEV[1] (calcre de Sénozan) Queutage MOV[1] (granit) *Ciment 300k*	Pressions MAX. / moy. Sans surcharge Clef 21k8 / 17k9 Reins 20.2 / 13.0 Retomb. 13.0 / 10.3 Avec surcharge Clef 22k0 / 20k9 Reins 25.0 / 14.8 Retomb. 17.8 / 11.8 *Arc élastique: lignes d'influence* Celles du règlemt du 29 août 1891	1° Voûtes transversa[les] vues, en plein ci[ntre] de 10m0.. sur piles de 1[m].. aux naissanc[es] 2° »

1. — Pour le sens de ces abréviations, voir Avertissement, Tome II, p. II, n° 6.
6. — Calculées par M. Freyssinet, Ingénieur des Ponts et Chaussées.

PONTS A UNE SEULE GRANDE ARCHE

TABLEAU SYNOPTIQUE

EXÉCUTION									CUBE DE MAÇONNERIE A MORTIER **Q** DÉPENSE **D** Totaux et par unité { de surface utile S_p [3] { de volume « utile » W [4]
FONDATIONS	GRANDE VOÛTE								
	CINTRE				MODE DE CONSTRUCTION	DÉCINTREMENT	TASSEMENTS DE LA CLEF		
	FERMES		Cube de bois Poids de fer Dépenses						
ature du sol Profondeur ous l'étiage Pressions sur le sol n kg/0m01² *Procédé*	Type *Matière* Appareils de décintrement	Nombre *Épaisseur* Écartement d'axe en axe *Surhaussement*	Totaux	par mq de douelle [2]		État d'avancement du pont *Temps entre le dernier clavage et le décintrement* Date	sur cintre t_c au décintrement t'_v après t''_v	
10	11	12	13	14	15	16	17	18

SÉRIE Â¹ Fr (⩾ 40m) *Suite du tableau synoptique Tome II, p. 122.*

10	11	12	13	14	15	16	17	18
Rocher 16k	» » Boites à sable	5 » 1m40 »			2 rouleaux			

SÉRIE Â¹ fr (⩾ 40m) *Suite du tableau synoptique Tome II, p. 180.*

10	11	12	13	14	15	16	17	18
Granit	à rayons *Bois* Boites à sable	4 *20cm* 1m40	180mc 2800k	0mc58 89k7	1 rouleau de moellons 5 joints secs	Voûte nue *8 jours*	t_c = 40mm t'_v = 0mm5	Q = 3670mc Q : S_p = 6mc07 Q : W = 0mc31
Granit » » *A sec*	Retroussé sur 34m contrefiches rayonnant en éventail de deux piles voisines des culées *Bois* Boites à sable et vérins à vis	3 *Cerveau 20cm* *Etage inférieur 24cm* 1m50 *0m10*	189mc6 2916k 39201f	0mc57 87k3 117f4	3 rouleaux 1 rouleau de moellons 2 rouleaux de queutage 5 joints secs	Piles des voûtes d'évidement construites *40 jours* 12 Novembre	t_c = 48mm t'_v = 0	

ur le calcul de la surface de douelle, voir Avertissement, Tome II, p. III, n° 7 — *A*. 3. S_p = Longueur (col. 2) × Largeur entre parapets (col. 3) — C'est la surface offerte à la circulation.
4. W = Surface vue de l'élévation × Largeur entre parapets. 5. W' = Surface de l'élévation au-dessus des fondations × Largeur entre parapets.
Pour S_p, W, W', voir Avertissement, Tome II, p. III, n° 7 - *B*.

PONT Date Symbole	PROJET — ENSEMBLE *Longueur* *entre abouts des parapets* Déclivités Hauteur maxima de la chaussée ou du rail au-dessus du sol ou de l'étiage	Largeurs { entre parapets *entre tympans* *sous la plinthe* } Fruit des tympans Revanche de la chaussée ou du rail sur l'extrados	GRANDE VOÛTE — INTRADOS Portée *Montée* Surbaissement *Rayons:* *cerveau* *reins*	ÉPAISSEURS — CORPS Clef *Retombées*	TÊTES Clef *Retombées*	MATÉRIAUX *Mortier* *Poids, pour 1mc de sable, de chaux ou de ciment*	PRESSIONS en kg/0m01² *Hypothèse adoptée* Surcharges supposées	1° ÉVIDEMENTS DES TYMPANS 2° *DÉCORATION DES TÊTES*
1	2	3	4	5	6	7	8	9
EN DEUX ANNEAUX SOUS ROUTE								
de **Villeneuve** *France* 1914–1916 $\hat{A}^1\hat{A}^1$ r^{te} ($\geqslant 40^m$)[1]	*123m45* » 17m41	10m90 (Chaussée de 7m30, 2 trottoirs de 1m80, voie du tramway au milieu) *10m90* » 0m57	Pour l'intrados voir la monographie 96m25 aux naissances 97m45 aux fondations *15m455* $\frac{1}{6,228}$ = 0,1606	1m45 *2m à 44m de la clef*	1m45 *2m à 44m de la clef*	Béton Gravier tout venant du Lot } 1mc *Ciment 350k* [*Ciments français de Boulogne. Usine de la Souys près de Bordeaux*]	Compressions maxima Sans surcharge / Avec surcharge Clef 42k / 51k Reins 39 / 57 Appuis 23 / 34 *Arc élastique (Méthode des courbes d'influence)* *On a tenu compte des variations de longueur dues aux changements de température, 75/10 autour de la moyenne pour des oscillations de ± 25°* Celles du règlemt du 29 août 1891.	1° Voûtes en plein cintre de 3m35 environ, sur piles d'épaisseurs croissant en s'éloignant de la clef, de 0m50 à 0m6[illegible] 2° *Petites moulures en creux dans le bandeau*
SOUS CHEMIN DE FER A VOIE NORMALE								
d'**Orkla** *Norvège* 1911–1915 $\hat{A}^1$ Fr ($\geqslant 40^m$)26	*86m* 0 47m	4m84 *4m20* Fruit : $\frac{1}{30}$ 1m60	Arc d'anse de pan. 60m00 *13m70* $\frac{1}{4.38}$ = 0.228 *47m50* *31m17*	1m80 *3m30*	1m80 *3m30*	Bandeaux et douelle : PT1 granit blanc Résistance (1150k à 1500k) Queutage : L1 *Ciment 560k*	MAX. en tenant compte des changements de température Sans surcharge / Avec surcharge Clef 41k / 45k Reins 37 / 51 Retomb. 35 / 47 *Arc élastique* 15T au m. ct	
de **Dombaas** *Norvège* 1913–19.. $\hat{A}^1$ Fr ($\geqslant 40^m$)27	*85m5* 0 34m60	4m80 *4m20* Fruit : $\frac{1}{30}$ 1m80	Arc d'anse de pan. 54m00 *11m40* $\frac{1}{4.74}$ = 0.21 *39m00* *36m445*	1m90 *2m20*	1m90 *2m20*	Bandeaux et douelle : PT1 Granit blanc (1000k) Queutage : L1 *Ciment 560k*	Pression maxima Sans surcharge / Avec surcharge Clef 16k5 / 29k2 Retomb. 20 8 / 49 1 15T au m. ct	1° 6 voûtes en plein cintre de 3m50 sur piles de 1m4[illegible] d'épaisseur 2° •
de **Gulfos** *Norvège* 1913–19... $\hat{A}^1$ Fr ($\geqslant 40^m$)28	*77m* 0 19m50	4m90 *4m30* Fruit : $\frac{1}{30}$ 1m60	Arc d'anse de pan. 46m00 *9m70* $\frac{1}{4.74}$ = 0.21 *36m50* *28m134*	1m60 *1m90*	1m60 *1m90*	Bandeaux et douelle : PT1 Granit (1240k à 1890k) Queutage : L1 *Ciment 560k*	Pression maxima Sans surcharge / Avec surcharge Clef 18k6 / 32k4 Retomb. 13 5 / 44 7 15T au m. ct	1° 6 voûtes en plein cintre de 3m40 sur piles de 1m4[illegible] d'épaisseur 2° •

1. — Pour le sens de ces abréviations, voir Avertissement, Tome III, page II, n° 6.

PONTS A UNE SEULE GRANDE ARCHE

TABLEAU SYNOPTIQUE

EXÉCUTION								CUBE DE MAÇONNERIE A MORTIER
FONDATIONS	GRANDE VOÛTE							**Q**
	CINTRE				MODE DE CONSTRUCTION	DÉCINTREMENT	TASSEMENTS DE LA CLEF	DÉPENSE **D**
Nature du sol Profondeur sous l'étiage Pressions sur le sol en kg : $\overline{0^m01}^2$ *Procédé*	FERMES: Type *Matière* Appareils de décintrement	FERMES: Nombre *Épaisseur* Écartement d'axe en axe *Surhaussement*	Cube de bois Poids de fer Dépenses: Totaux	Cube de bois Poids de fer Dépenses: par mq de douelle [2]		État d'avancement du pont *Temps entre le dernier clavage et le décintrement* Date	sur cintre t_c au décintrement t'_v après t''_v	Totaux et par unité de surface utile S_p [3], de volume « utile » W [4].
10	11	12	13	14	15	16	17	18
SÉRIE $\widehat{A}^1$ $\widehat{A}^1$ r^{te} ($\geqslant 40^m$)								*Pour la série $\widehat{A}^1$ r^{te} ($\geqslant 40^m$) suite du tableau synoptique, Tome III, p. 16.* *Pour la série $\widehat{A}^1$ $\widehat{A}^1$ r^{te} ($\geqslant 40^m$) suite du tableau synoptique, Tome II, p. 64.*
Très marneux (Mollasse) 2m10 à 3m20 *Épuisements*	Poteaux et contrefiches (V. p. 135, 137) Pas d'appareil de décintrem^t dans le cintre	2 fermes par anneau de 3m On a construit en même temps les 2 cintres : on a été ainsi plus vite et par conséquent moins exposé aux crues du Lot. *20cm* 1m80	Pour les deux anneaux 405mc environ 7.900k environ	0mc64 12k5		Voûtes nues *31 jours*		D (à forfait) = 430.000f D : S_p = 319f6 D : W = 23f2
SÉRIE $\widehat{A}^1$ F^r ($\geqslant 40^m$) *Suite du tableau synoptique Tome III, p. 90.*								
Rocher » 25k »	Retroussé sur 37m50 Contrefiches, partant en éventail de chaque rive, soutenant une poutre en bow-string à treillis en N. *Bois en grume* Boîtes à sable sur coins.	7 » 0m80 *60mm*	780mc 83.340f	2mc10 224f9	3 rouleaux en plusieurs tronçons	Les tympans exécutés à moitié » 4 novembre	t_c = 10mm t'_v = 4mm	Q = 2700mc Q : S_p = 6mc60 D = 333.360f D : S_p = 814f8 D : Q = 123f5
Rocher » 27k »	Retroussé Fermes à 3 articulations Coins	5 » 1m *62mm*	34.725f	109f93	3 rouleaux en plusieurs tronçons			
Rocher » 25k »	Retroussé Fermes à 3 articulations Coins	5 » 1m10 *50mm*	27.780f	106f18	2 rouleaux : un en 12 tronçons			

2. Pour le calcul de la surface de douelle, voir Avertissement, Tome III, p. III, n° 7 — *A*. 3. S_p = Longueur (col. 2) × Largeur entre parapets (col. 3) — C'est la surface offerte à la circulation
4. W = Surface vue de l'élévation × Largeur entre parapets. 5. W' = Surface de l'élévation au-dessus des fondations × Largeur entre parapets.
Pour S_p, W, W', voir Avertissement, Tome III, p. III, n° 7 — *B*

PONTS A PLUSIEURS GRANDES ARCHES

PONT Date Symbole *En quoi consiste l'ouvrage*	PROJET							
	ENSEMBLE		GRANDES VOÛTES					
	Longueur entre abouts des parapets Déclivités Hauteur maxima de la voie au-dessus du sol ou de l'étiage	Largeurs entre parapets *entre tympans sous la plinthe* Fruit des tympans Revanche de la voie portée sur l'extrados	INTRADOS Portée *Montée* Surbaissement *Rayons :* *cerceau* *naissances*	ÉPAISSEURS CORPS ET TÊTES Clef *Retombées*	COMMENT SONT ARMÉES LES VOÛTES	MATÉRIAUX *Mortier* *Poids, pour 1mc de sable, de chaux ou de ciment*	PRESSIONS en kg/0m01² *Hypothèse adoptée* Surcharges supposées	1° ÉVIDEMENTS DES TYMPANS 2° *DÉCORATION DES TÊTES*
1	2	3	4	5	6	7	8	9
EN DEUX ANNEAUX SOUS CHEMIN DE FER A VOIE NORMALE								
Sur le **Tunkhannock Creek** près de **Nicholson** *Etats-Unis* 1912-1915 *10 arches en plein cintre de 54m864 et 2 arches de rive de 30m48 (faisant office de culées évidées)*	*679m70* 5mm2 73m15 au-dessus de l'eau	10m36 2 voies *Anneaux, en douelle à la clef* *4m267* Vide entre eux 1m829 Chaque anneau porte une voie. Pas de fruit.	Pleins cintres 54m,864	2m438 *5m182 aux naissances des piles*		Béton Ciment 1v Sable 3v Cailloux 5v	Surcharge sur chaque voie : train de 9T par mètre, traîné par 2 machines : soit Mikado pesant chacune 211T soit Mallet pesant chacune 272T5	1° Viaduc en béton armé à 11 arches en plein cintre sur le dos des grandes voûtes. Piles distantes de 5m18 d'axe en axe. Parapet en béton armé de 0m91 d'épaisseur, 1m22 de hauteur. 2° *Les fûts des piles sont rayés de stries horizontales tous les 1m22*
Sur le **Martin's Creek** ligne de Clark Summit à Halstead. (Delaware Lackawanna and Western RR, Cy). *Etats-Unis* 1913 *11 arches* *9 en anse de panier : 7 de 45m72, 2 de 30m50 ; 2 en plein cintre de 17m25*	*491m55* » 45m75 au-dessus du thalweg.	14m54 3 voies *Anneaux en douelle à la clef* *5m338* Vide entre eux 3m66	Anses de pan. à 3 centres 45m,72 *17m98* $\frac{1}{2,543}$ = 0,393 *25m* *12m40*	1m,83		Béton Ciment 1v Sable 3v Cailloux 5v		1° Viaduc en béton armé à 10 arches en arc sur le dos des grandes voûtes. Piles distantes de 4m76 d'axe en axe 2° »
EN QUATRE ANNEAUX SOUS ROUTE								
Sur le **Latah Creek** à **Spokane** *États-Unis* 1911-1913 *Chaussée et 2 voies de tramway en 4 anneaux : 7 arches en anse de pan. : 2 de 45m72, 2 de 41m18, 1 de 39m et 2 de 16m47.*	*286m70* » 42m40 au-dessus du sol.	(Chaussée de 13m725, 2 trottoirs de 2m135). *Anneaux en douelle à la clef ; 2 de 1m525 2 de 1m83* Vide entre eux 3m353, 3m81 3m353	Anses de panier 45m,72 *19m51* $\frac{1}{2,343}$ = 0,427	1m,14		Béton		1° Arches en plein cintre sur le dos des grandes voûtes 2° »

1. — Pour le sens de ces abréviations, voir Avertissement, Tome III, page II, n° 6.

TABLEAU SYNOPTIQUE

Suite du tableau synoptique, Tome III, p. 286.

EXÉCUTION								CUBE DE MAÇONNERIE A MORTIER Q DÉPENSE D
…NDATIONS	GRANDES VOÛTES							
	CINTRES				MODE DE CONSTRUCTION	DÉCINTREMENT	TASSEMENTS DE LA CLEF	
…ture du sol …rofondeur …us l'étiage …Pressions sur le sol kg/$\overline{0^m01}^2$ *Procédé*	FERMES Type *Matière* Appareils de décintrement	FERMES Nombre *Épaisseur* Écartement d'axe en axe *Surhaussement*	Cube de bois Poids de fer Dépenses Totaux	Cube de bois Poids de fer Dépenses par mq de douelle [2]		État d'avancement du pont *Temps entre le dernier clavage et le décintrement* Date	sur cintre t_c au décintrement t'_v après t''_v	Totaux et par unité { de surface utile S_p [3] / de volume « utile » W [4]
10	11	12	13	14	15	16	17	18
…able pur …uillé, puis rocher. 91m44 …parapet au …nt le plus bas des …ndations. …: piles 3 à 8, …ofondeur …qu'à 30m48 …s le sol, …)sous l'eau. *…isements.* *…illes dans des …ns sans fond à …rois faites …palplanches …étalliques.* *…ton dans caissons.*	*Cintre métallique pour 1 anneau, transporté sous l'autre.*	4 » 1m17 Un jeu de 5 cintres *76mm*			Tranches séparées par des vides remplis 7 jours après.		t_c de 35mm à 60mm t'_v Sur 1 voûte 6mm4 Sur 3 voûtes 3mm2 Sur les 16 autres 0	Environ 123849mc de béton 1000T de fer pour armatures.
…able et …ses pierres …is rocher …0 à 21m35 …s le sol *…illes dans caissons …alliques …omme …iaduc de …khannock*	*Cintre métallique pour 1 anneau, transporté sous l'autre*	4 » » Un jeu de 4 cintres	700.000k		Tranches séparées par des vides remplis après	*30 jours sur cintre*		Cube du béton : Chaque anneau des grandes voûtes 765mc Q = 64260mc (envir.) SOURCES : S1 — Engineering Record, 27 décembre 1913, p. 710. S2 — Voir photographies du viaduc dans le supplément au "The Engineer", 17 mars 1916.
ou sable compact » …e sable on …é le poids …le larges …ttements …6k4	Fixe *Bois*				Anneaux construits par paire, chaque anneau par tranches avec vides à la clef et aux reins remplis après		t_c = 18mm3	SOURCES : S1 — Engineering Record, 22 mars 1913, p. 312.

…le calcul de la surface de douelle, voir Avertissement, Tome III, p. III, n° 7 — *A*. 3. S_p = Longueur (col. 2) × Largeur entre parapets (col. 3) — C'est la surface offerte à la circulation.
4. W = Surface vue de l'élévation × Largeur entre parapets. 5. W' = Surface de l'élévation au-dessus des fondations × Largeur entre parapets.
Pour S_p, W, W', voir Avertissement, Tome III, p. III, n° 7 — *B*.

PONTS A PLUSIEURS GRANDES ARCHES SOUS CHEMIN DE FE[R]

PONT Date Symbole *En quoi consiste l'ouvrage* 1	PROJET — ENSEMBLE *Longueur* *entre abouts des parapets* Déclivités Hauteur maxima du rail au-dessus du sol ou de l'étiage 2	Largeurs { entre parapets / *entre tympans* *sous la plinthe* Fruit des tympans Revanche du rail sur l'extrados 3	GRANDE VOÛTE — INTRADOS Portée *Montée* Surbaissement *Rayons* 4	ÉPAISSEURS CORPS ET TÊTES Clef *Joints de rupture* Retombées 5	ROTULES *Pour les dimensions, rayons, pressions,... voir Tome IV, Livre III.* 6	MATÉRIAUX *Mortier* *Poids, pour 1mc de sable, de chaux ou de ciment* 7	PRESSIONS en $kg/\overline{0^m01}^2$ Surcharges supposées 8	1° ÉVIDEMENT DES TYMPANS 2° *DÉCORATION DES TÊTES* 9
de **Cannstatt** *Wurtemberg* 1911-1914 Âⁿ Fʳ (⩾ 40m)[1] *Rive gauche : voûte en béton armé de 16m* *Corps central : 3 voûtes en béton à 3 articulations de 56m60, 61m60, 55m90.* *Rive droite : 2 voûtes en béton de 17m, une voûte en béton armé de 20m.*	*322m30* R G 5mm6 R D	(4 voies) Largeur entre parapets : 17m,90 à une extrémité 24m à l'autre 15m au milieu de l'arche en rivière Fruit variable	Arcs de 75m de rayon à la clef, surbaissés au $\frac{1}{10}$. Voûte de R G { Entre appuis 56m,60 / Entre axes des rotules 49m Voûte centrale { Entre appuis 61m,60 / Entre axes des rotules 54m Voûte de R D { Entre appuis 55m,90 / Entre axes des rotules 49m	1m,48 *1m,86* *(au 1/4 de l'arc)* 1m,56 1m,73 *2m* *(au 1/4 de l'arc)* 1m,86 1m,48 1m,86 *(au 1/4 de l'arc)* 1m,56	Rotules en acier moulé Siemens-Martin non trempé maintenues transversalement par des goujons de 50mm Rayons des surfaces 600mm, 750mm. Elles sont polies sur 150mm Acier à 45k 12 % d'allongement sur 200mm Pression maxima sur la bande de contact $30^k5/\overline{0,001}^2$ (formules de Hertz IV., p. 11). Travail maximum des goujons au cisaillement 7k8 167 couples de rotules. Ils pèsent : les plus lourds 1.708k, les plus légers 1.110k, Ensemble 233T Sommiers d'appui en béton non armé à 1 : 2 : 2 Travail : 75k sous les rotules.	Béton pilonné à l'air comprimé. Pour 1v de ciment Sable..... 2v Gravier... 3v5 } 8v Muschelkalk cassé (25mm à 45mm).... 2v5 Ciment Dyckerhoff.	Pressions maxima dans la voûte en rivière, surchargée : Clef......... 50k6 1/4 de la portée..... 49 1 Retombée ... 45 1 Pour tenir compte des efforts latéraux (chocs, force centrifuge, vent) on n'a compté la voûte que pour les 95 % de sa largeur réelle. 2 locomotives à 5 essieux de 85T nombre illimité de wagons : les 4 ou 2 voies chargées dans les conditions les plus défavorables. Force centrifuge pour une vitesse de 80 kilomètres Effet des chocs latéraux 8 %. Freinage au 1/6 du poids freiné. Vent de : 150k pont chargé 250k pont vide. Pression des hautes eaux et des glaces 600k par mq. de surface de pile.	1° Vides au-dessus des piles, entre les rotules entre des cloiso[ns] et sous un tabl[ier] en béton armé

1. — Pour le sens de ces abréviations, voir Avertissement, Tome IV, page II, n° 6.

TABLEAU SYNOPTIQUE

<table>
<tr><th colspan="8">EXÉCUTION</th><th rowspan="4">CUBE DE MAÇONNERIE A MORTIER
Q
DÉPENSE
D
Totaux
et
par unité { de surface utile S_p [3]
{ de volume « utile » W [4]</th></tr>
<tr><th rowspan="3">FONDATIONS
...ture du sol
Profondeur sous l'étiage
Pressions sur le sol kg/0m01²
Procédé</th><th colspan="7">GRANDES VOÛTES</th></tr>
<tr><th colspan="4">CINTRES</th><th rowspan="2">MODE
DE
CONSTRUCTION</th><th rowspan="2">DÉCINTREMENT
État d'avancement du pont
Temps entre le dernier clavage et le décintrement
Date</th><th rowspan="2">TASSEMENTS DE LA CLEF
sur cintre t_c
au décintrement t'_v
après t''_v</th></tr>
<tr><th>FERMES
Type
Matière
Appareils de décintrement</th><th>Nombre
Épaisseur
Écartement d'axe en axe
Surhaussement</th><th>Cube de bois Poids de fer Dépenses
Totaux</th><th>par mq de douelle [2]</th></tr>
<tr><td>10</td><td>11</td><td>12</td><td>13</td><td>14</td><td>15</td><td>16</td><td>17</td><td>18</td></tr>
<tr>
<td>...m environ d'argile ... de vase, ...s 3 à 4m50 ...e gravier compact ; dessous, ...arne dure calcaire.

...ens quelques fouilles, dégagement ...ide carbonique.

...us grande profondeur sous l'eau 6m

Pression maxima ...ur le sol 6k9

...ulées sur ...ier général.

...es fondées ... la marne par ...uisements ...ans des ...tardeaux ...rideau de ...planches ...talliques.</td>
<td>Fixe

Poteaux et contrefiches isolées

(type P. C. V. p. 135, 137)

»

Vérins à vis.</td>
<td>Voûte rive droite (un anneau)

10 fermes

les autres 8

»

»

Surhaussement
1er Anneau
<table><tr><th></th><th colspan="2">Voûtes</th></tr><tr><th></th><th>de rive</th><th>central</th></tr><tr><td></td><td>mm</td><td>mm</td></tr><tr><td>Clef</td><td>60</td><td>70</td></tr><tr><td>rotules de retombées</td><td>20</td><td>20</td></tr><tr><td>Naissces</td><td>0</td><td>0</td></tr></table>2e Anneau

(d'après les abaissements constatés au 1er)

55mm à la clef.</td>
<td></td>
<td></td>
<td>A pleine épaisseur en 20 tranches.</td>
<td>Tympans, parapets et trottoirs posés.

On décintra : le 1er anneau (moitié sud) le béton ayant 74 jours.

30 Août
le 2e à 47 jours.</td>
<td>t'_v et t''_v pendant 5 jours
<table><tr><th></th><th>1er ann.</th><th>2e ann.</th><th>Calculé</th></tr><tr><td></td><td>mm</td><td>mm</td><td>mm</td></tr><tr><td>Vte R G</td><td>15</td><td>16</td><td>20</td></tr><tr><td>en rivière</td><td>26</td><td>29</td><td>25</td></tr><tr><td>Vte R D</td><td>12</td><td>15</td><td>20</td></tr></table>Recul des piles culées
<table><tr><th>Piles culées</th><th>1er ann.</th><th colspan="2">2e ann.</th></tr><tr><th></th><th></th><th>amt</th><th>aval</th></tr><tr><td></td><td>mm</td><td>mm</td><td>mm</td></tr><tr><td>R G</td><td>1,7</td><td>0,4</td><td>1</td></tr><tr><td>R D</td><td>1,9</td><td>0,4</td><td>1,2</td></tr></table></td>
<td>Cube de béton :

Fondations............ 17700mc
Élévation { Piles et tympans... 8100
Voûtes { non armées 8150
Voûtes { armées.... 760
Cloisons d'évidemt 640
Le reste........... 5150

Total Q = 40500mc

D = 1.974.400f

D : S_p = 327f5</td>
</tr>
</table>

...le calcul de la surface de douelle, voir Avertissement, Tome IV page III, n° 7 — *A*. 3. S_p = Longueur (col. 2) × Largeur entre parapets (col. 3) — C'est la surface offerte à la circulation
4. W = Surface vue de l'élévation × Largeur entre parapets. 5. W' = Surface de l'élévation au-dessus des fondations × Largeur entre parapets.
Pour S_p, W, W', voir Avertissement, Tome IV, page III, n° 7 — *B*.

PONTS A VOÛTES DE 40^{m} ET PLUS ACHEVÉS APRÈS 1912

MONOGRAPHIES

VOÛTES INARTICULÉES EN PLEIN CINTRE
PONTS A UNE SEULE GRANDE ARCHE SOUS CHEMIN DE FER A VOIE NORMALE

SÉRIE C^1 F^r ($\geqslant 40^m$)

(Voir tableau synoptique I. p. 38 et monographies I. p. 41 à 50)

PONT SUR LA « CALANQUE » DES EAUX-SALÉES *(BOUCHES-DU-RHÔNE)*

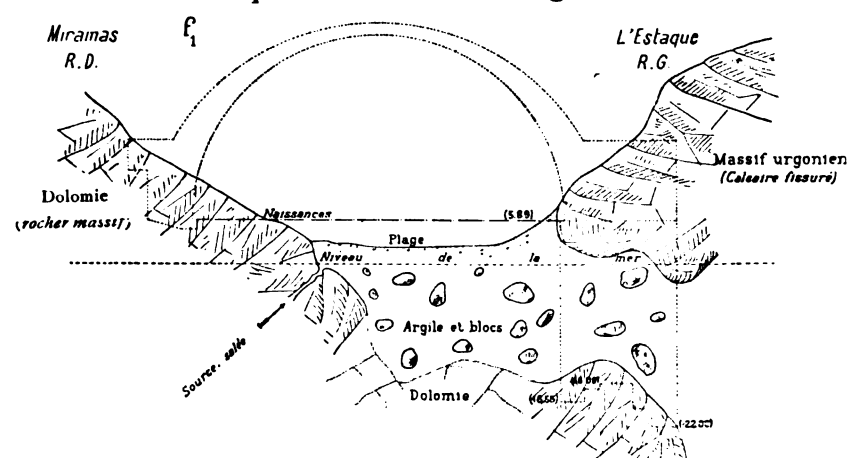
Ligne de Miramas à L'Estaque

1911-1914 C^1 F^r ($\geqslant 40^m$)[4]

Φ_1 — aval — Juin 1915.[1]



1. Pourquoi on a fait une grande arche. — Le creux est comblé de blocs de rocher noyés dans de l'argile : on n'y pouvait pas fonder (f_1).



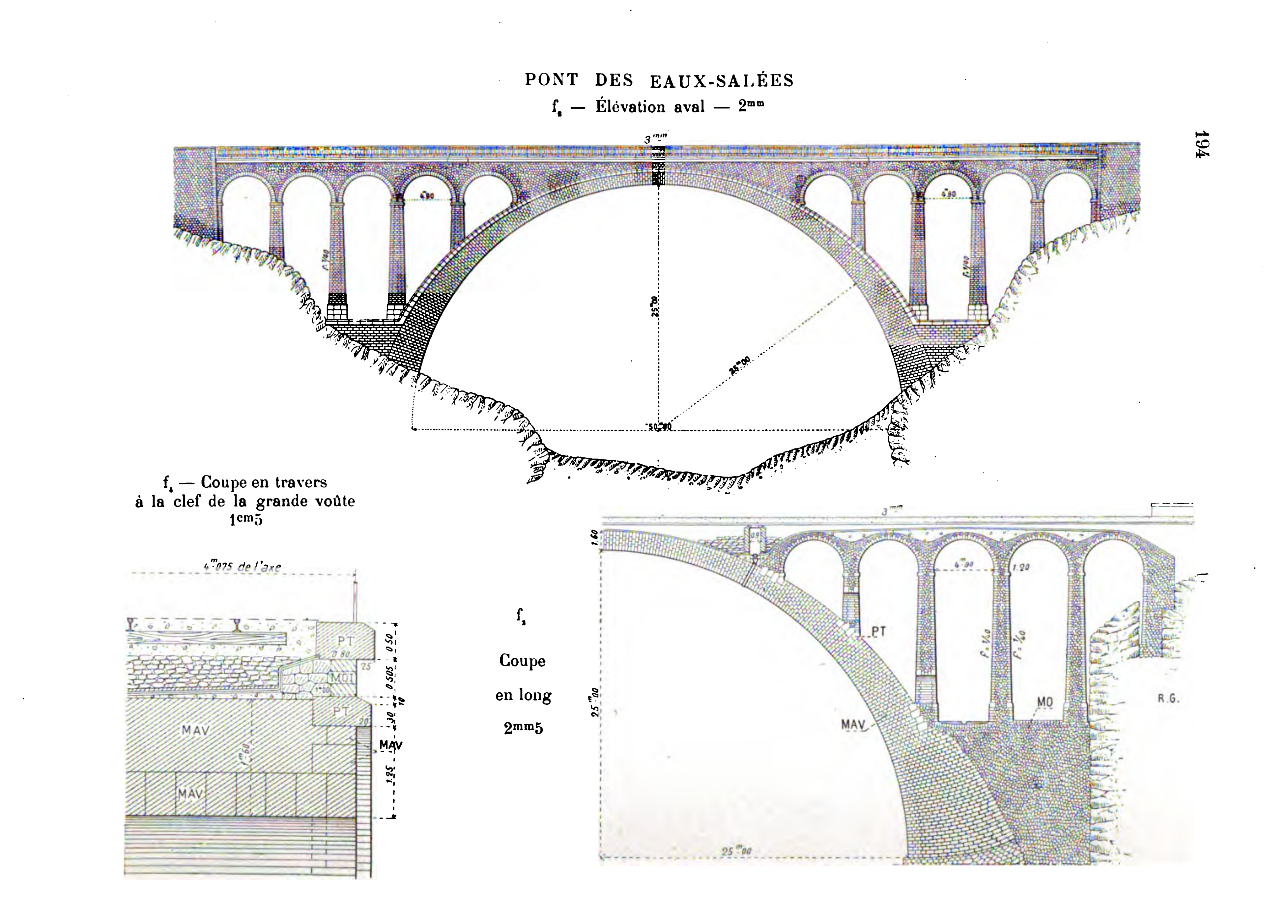
Le rocher RD — dolomie — est troué de cavernes : en bas sourd une abondante source salée.[2]

Le rocher RG est un bloc charrié : il a fallu descendre à 22^m sous la mer.

1. — Cliché de M. Bertrand, Sous-Chef de section de la Cie P.-L.-M.
2. — Débit 500^l à 1500^l par 1" — Température constante 22°.

PONT DES EAUX-SALÉES

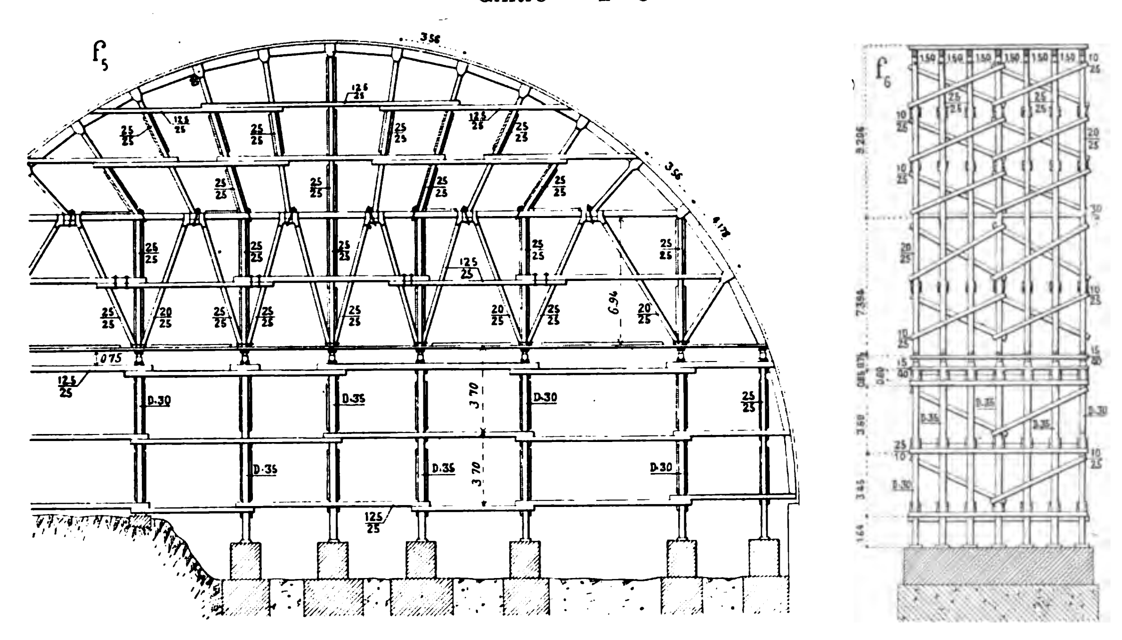
f₂ — Élévation aval — 2mm



f₄ — Coupe en travers à la clef de la grande voûte 1cm5

f₃ Coupe en long 2mm5

Cintre — 2mm5



2. Cintre. — C'est le cintre du Pont de Lavaur.[3] — On l'a calculé pour la demi-épaisseur de la voûte par les formules employées à Lavaur.[4]

Les vaux sont en 2 pièces boulonnées.

6 palées reposaient sur des massifs de béton fondés sur pieux battus dans l'argile.

Un transporteur à câble a monté le cintre, et plus tard amené les matériaux.

Coût du cintre :

	Main-d'œuvre	Fournitures	Ensemble
Fondations..................	8.415f41	11.480f75	19.896f16
Elévation..................	10.941 90	46.195 23	57.137 13
Totaux.........	19.357f31	57.675f98	77.033f29

3. Fondations. — *A. Culée Miramas.* Une caverne sous la fouille a été bourrée de béton de ciment.

B. Culée L'Estaque. (21 mars 1911 — 15 novembre 1912). A l'arrière, la fouille a 45m de haut, dont 20m dans l'argile.

Pour la boiser, on a employé 599mc de sapin en grume, 4451mq de planches de 4c.

Une source qui jaillissait d'une paroi a été aveuglée par des feuilles de tôle coaltarée.

On a taillé en gradins le rocher, très incliné, de la base.

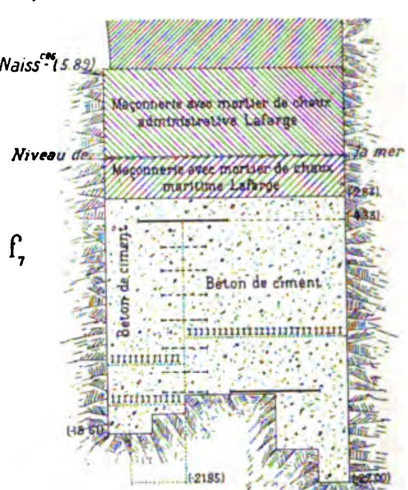
Un angle, où l'on ne pouvait épuiser, a été rempli de sacs de mortier de ciment. Jusqu'à — 2m83, on a employé du béton très gras. (1mc de pierre cassée, 0mc66 de mortier à 550k de ciment artificiel Lafarge de Valdonne pour 900l de sable).

3. — II, p. 137. 4. — V, p. 155.

On a noyé des assises de vieux rails (f_7) :

1° Au-dessus des gradins de fondation pour y étaler la pression.

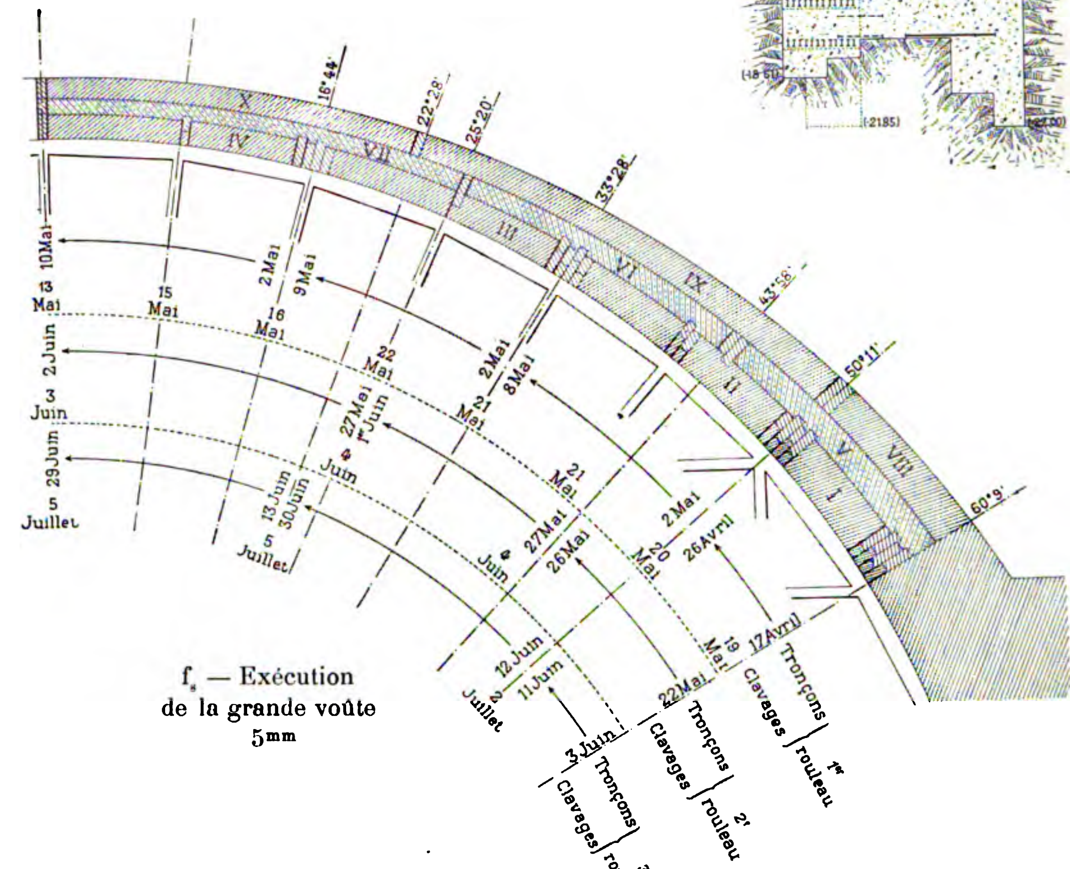
2° Tous les 1^{m}50 de hauteur, pour relier au corps la face antérieure de la culée.



f_7

4. Exécution de la grande voûte (f_8). —

Même méthode qu'au pont de Lavaur[5].



f_8 — Exécution de la grande voûte 5mm

A. — Épaisseur des rouleaux.

		1er rouleau		2e rouleau		3e rouleau	
		Maxima	Minima	Maxima	Minima	Maxima	Minima
Corps de la voûte.	à 60°	1^{m}40	1^{m}20	0^{m}80	0^{m}80	1^{m}20	1^{m}00
	à la clef.	0 80	0 60	0 40	0 40	0 60	0 40
Bandeaux.........	à 60°	1 40	1 20	0 80	0 80	1 25	1 05
	à la clef.	0 80	0 60	0 65	0 45	0 40	0 40

B. 1er rouleau. — Les tronçons **I** achevés, on chargea le cintre sur 20° de chaque côté de la clef, de 80^{mc} de moellons, — à peu près l'épaisseur du 1er rouleau.

I et **II** étaient sur coffrages, **III** et **IV** sur taquets.

On clava en descendant de la clef jusqu'à 16°44', puis en montant des retombées.

5. — II, p. 139.

Avant le clavage, les bandes de plomb de l'intrados étaient matées au refus, le joint nettoyé et lavé à grande eau.

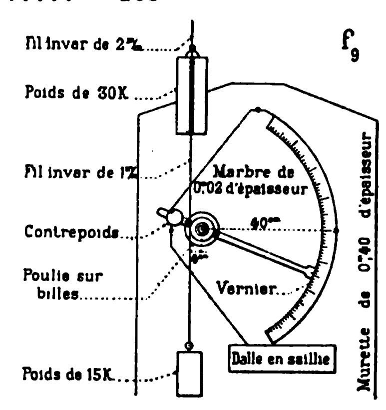
On matait les joints d'un moellon 2 jours après sa pose.

C. 2e et 3e rouleaux. — On les clava à partir de la clef.

D. Mortier de matage.

Sable de calcaire broyé.................. 900[l]
Ciment artificiel Lafarge de Valdonne.... 550[k]
Eau.................................... 165[l] [6]

5. Tassements. — Sur chaque tête, à la clef, à 33°27'40" côté Miramas, à 25°5'31", côté l'Estaque, un fil « invar » de 2mm transmettait les tassements à un cadran (f_9) scellé dans un massif.



Voici les tassements observés :

Dates	Phases de la construction		Tassements en mm — A 33° 27' 40" Côté Miramas — Amont	A 33° 27' 40" Côté Miramas — Aval	Clef — Amont	Clef — Aval	A 25° 5' 31" Côté L'Estaque — Amont	A 25° 5' 31" Côté L'Estaque — Aval
26 Avril	1er rouleau	Tronçons I achevés.	0	0	0	0	0	0
2 Mai		Cerveau du cintre chargé	mm 2.5	mm 2.6	mm 10.7	mm 11.9	mm 6.4	mm 5.6
5			5.2	5.4	14.1	15.0	9.5	9.0
13		Clavages	15.7	17.0	23.8	25.7	22.9	22.9
14			15.9	17.0	23 7	25.7	22.9	23.0
19			17.8	18.9	26.3	28.0	25.6	25.0
20			18.7	19.8	27.2	28.8	26.8	26.2
21			19.3	20.3	27.4	29.2	27.4	27.0
22	2e rouleau		19.4	20.5	27.2	29.2	27.4	27.1
2 Juin			20.7	21.6	27.4	29.9	27.9	28.0
3		Clavages	20.8	21.6	27.6	30.2	27 9	28.0
4			20.9	21.6	27.8	30.3	28.0	28.0
7	3e rouleau	Exécuton des tronç. VIII	21.1	22.0	28.2	30.5	28.3	28.8
12			21.9	22.9	28.3	31.0	28.9	29.5
13		On fixe à la douelle les fils invar amt	22.1	23.1	28.4	31.2	28.9	29.8
14			22.3	23.2	28.4	30.9	29.0	29.7
16		On fixe à la douelle les fils invar avl	22.4	23.5	28.3	31.2	29.0	29.8
28			23.5	24.7	28.8	32.2	29.8	30.6
1er Juillet		Clavages	23.6	24.8	28.9	32.4	29.9	30.6
4			23.8	24.8	29.0	32.4	29.9	30.8
15			24.64	25.18	29.21	32.7	30.12	31.09
12 Août	Avant	décintrement	26.32	25.85	29.15	32.8	30.38	31.56
	Après	décintrement	26.38	25.86	29.37	33.11	30.49	31.67
18			27.25	26.12	29.62	33.28	30.63	31.83

6. — Au lieu de 231[l] pour le mortier ordinaire. (voir V, p. 166).

Tassements au décintrement.

	Tête amont	Tête aval
Clef	0mm22	0mm31
Joint à 23° 27' 40" de la clef. Côté Miramas	0, 06	— 0, 01
Joint à 25° 5' 31" — id. L'Estaque	0, 11	— 0, 11

Au clavage, il a plu, puis a soufflé le mistral qui a desséché le bois et commencé le décintrement.

6. Quantités et dépenses.

	Cubes	Prix Main-d'œuvre	Prix Fournitures	Prix Ensemble	Prix de revient du mc.
Fouilles — Culée l'Estaque	4160mc	119.952f79	101.161f61	221.114f40	53f15
Fouilles — Autres fouilles	9433	42.916 35	23.292 10	66.208 45	7 02
Maçonneries — Fondations de la culée l'Estaque	4160	17.662 13	79.287 20	96.949 33	21 66
Maçonneries — Autres maçonneries	7460	153.296 18	366.955 46	520.251 64	69 77
Cintres		60.342 69	33.342 31	93.685 00	» »
		394.170f14	604.038f68	998.208f82	

7. Quelques prix d'unité.

A. — *Matériaux à pied d'œuvre*

Bois de charpente	le mc	75f
Sapin en grume	—	70
Planches de 4cm	le mq	2 50
Ciment artificiel Lafarge de Valdonne	la tonne	50f
Chaux de Lafarge maritime	—	42
Chaux de Lafarge administrative	—	33
Sable de calcaire broyé	le mc	5
Moellons bruts (des tranchées)		2f
Moellons équarris		16
Moellons d'appareil		52 / 65
Moellons — grande voûte		80
Libages		70
Pierre de taille de Châteauneuf		80
Pierre de taille de Ruoms		105

B. — *Salaires (Prix de l'heure)*

Chef charpentier, mécanicien, maçon	1f
Chef de chantier	0.90
Tailleur de pierre	0.80
Charpentier	0.75
Maçon	0f73
Mécanicien	0.70
Mineur, boiseur	0.52
Terrassier, manœuvre	0.45

8. Personnel (Cie P.-L.-M.)

Ingénieur en Chef : M. Canat.
Ingénieur : M. Delaly.
Chef de section : M. Gay.
Sous-Chef de section : M. Bertrand.
Entrepreneurs : MM. Ruvenhorst et Milliat.

PONTS A UNE SEULE GRANDE ARCHE
SOUS CHEMIN DE FER A VOIE ÉTROITE

SÉRIE C^1 f^r ($\geqslant 40^m$)

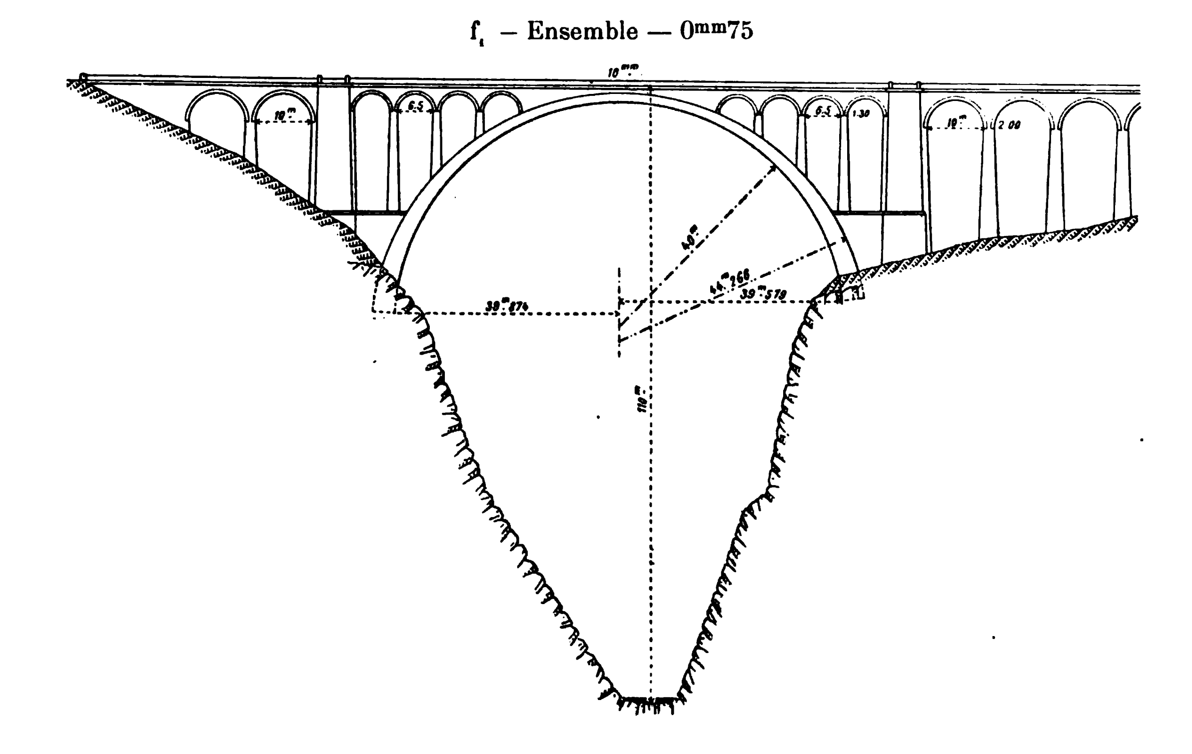
(Voir tableau synoptique I. p. 52 et monographies I. p. 55 à 58)

PONT SUR LA ROIZONNE A 6^k DE LA MURE *(ISÈRE)* [1]

Ligne électrique à voie de 1^m de La Mure à Gap
et Chemin de grande Communication.

1912-1916 C^1 f^r ($\geqslant 40^m$) [2]

f_1 — Ensemble — $0^{mm}75$



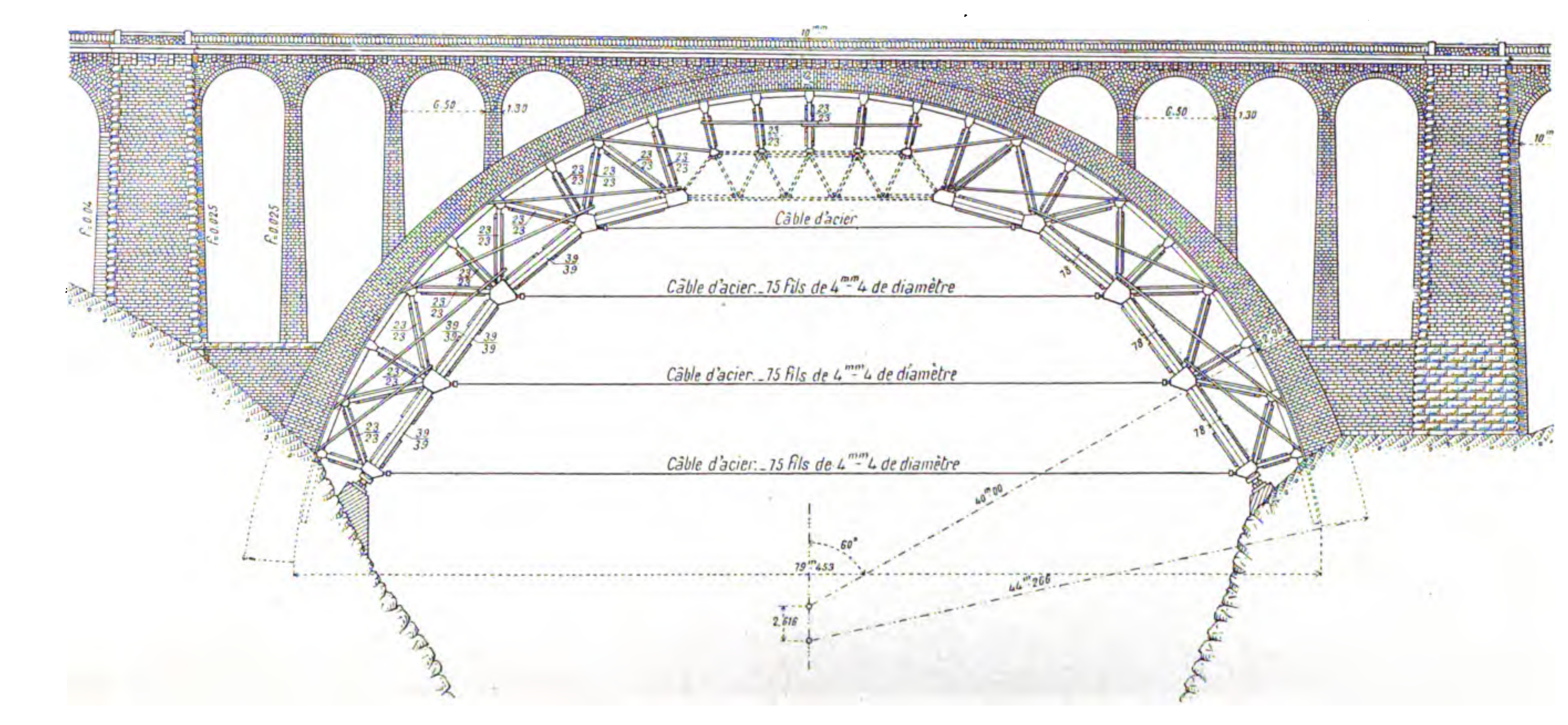
1. Intrados. — C'est réellement un arc de cercle très peu surbaissé : il diffère très peu d'un plein cintre, je le compte comme tel.

2. Hauteur de la voie au-dessus du thalweg. — 110^m [2]

1. — Voir tableau synoptique VI, p. 180.
2. — Il y a 86^m à Solis (I, p. 56 f_1), 88^m à Wiesen (I, p. 236 f_1).

PONT SUR LA ROIZONNE

f_2 — Grande voûte — 2mm



Φ_1 — Octobre 1915



3. Cintre. — C'est le type de Luxembourg,[3] dans lequel l'entrait armé est remplacé par une poutre armée. Il a été calculé par les mêmes méthodes, les mêmes formules, avec les mêmes charges, les mêmes efforts par $\overline{0^m01}^2$.

3. — II, p. 70-74.

Sur chaque rive, on a monté et assemblé les 4 panneaux inférieurs des 4 fermes; le tout a été soulevé et mis en place à l'aide d'un chariot porté par un câble transporteur, puis soutenu en porte à faux par des câbles amarrés aux grandes piles. Les poutres métalliques faisant clef des 4 fermes ont été mises en place l'une après l'autre[4].



Φ_2. — Cintre en montage — Juillet 1914.



Φ_3. — Clavage du 2e rouleau — Déc. 1914.

4. Personnel.

Ingénieurs :

Projet : M. Rivoire-Vicat, Inspecteur Général des Ponts et Chaussées.

Direction des Travaux : M. Rivoire-Vicat.
M. Wilhelm, Ingénieur en Chef.
MM. Millot et Genet, Ingénieurs ordinaires.
M. Humbert, Sous-Ingénieur, Chef de Section.

Entrepreneurs : MM. Fayolle et Pascal.

4. — Toute cette opération a été très bien conduite par M. Bonnet, maître charpentier, à Grenoble.

SOURCES :

Dessins et renseignements gracieusement communiqués par M. l'Inspecteur Général Rivoire-Vicat.

VOÛTES INARTICULÉES EN ELLIPSE

PONTS EN DEUX ANNEAUX
A PLUSIEURS GRANDES ARCHES SOUS ROUTE

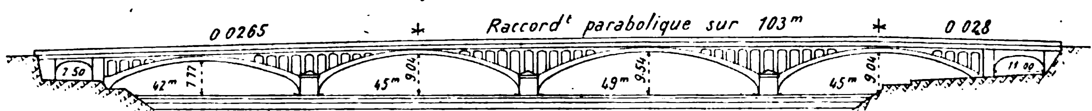
SÉRIE E^n E^n r^{te} (⩾ 40m)

(Voir tableau synoptique I, p. 190 et monographies I, p. 193 à 207)

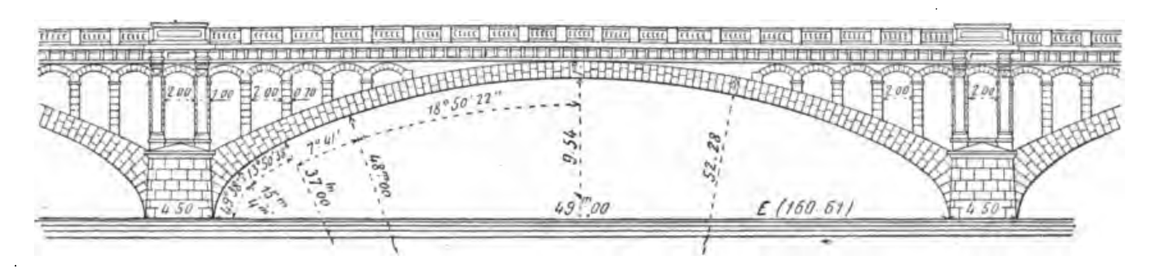
PONT DE L'HÔTEL-DIEU, SUR LE RHÔNE, A LYON [1]

1912-1916 E^n E^n r^{te} (⩾ 40m)2

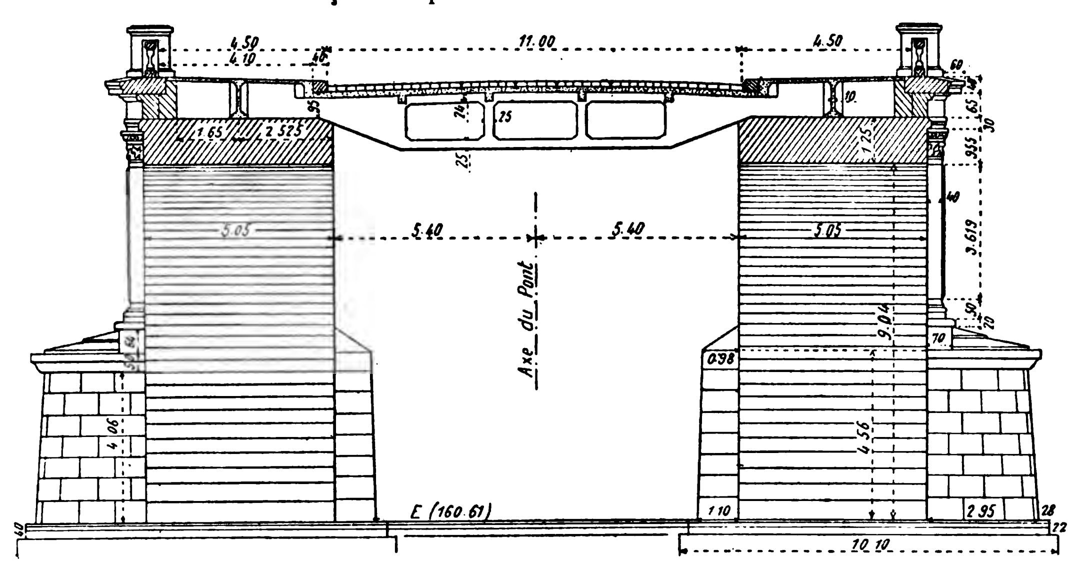
f_1 — Ensemble — 0mm6



f_2 — Voûte de 49m — 2mm



f_3 — Coupe en travers à la clef — 5mm



1. — Voir tableau synoptique VI, p. 182.

Personnel.

Projet: M. Auric, Ingénieur en Chef de la Ville, Ingénieur en Chef des Ponts et Chaussées. (Type de pont, dimensions des voûtes).

M. Chalumeau, Ingénieur en Chef de la Ville.

M. Fabrègues, Ingénieur.

Φ_1 — Vue prise de la rive gauche — 9 mars 1916.



Φ_2 — Anneau aval, voûte de 49^m — 5 nov. 1914. [2]



Travaux : M. Chalumeau, Ingénieur en Chef, M. Cortot, Ingénieur.

M. Fauton, Conducteur Principal.

Entrepreneurs :

Fondations : M. Joya, de Grenoble.

Élévation et dalle en béton armé : MM. Rouchon, Desseauve et Cochet frères, de Lyon.

Fourniture de pierre de taille : M. Sauvain, à Corgoloin.

2. — Voir sur la découpe dans une même assise III, p. 67, art. 5 B — V, p. 18, art. 2.

SOURCES : Dessins, photographies, renseignements, gracieusement communiqués par M. Chalumeau, Ingénieur en Chef de la Ville de Lyon.

PONTS A PLUSIEURS GRANDES ARCHES SOUS CHEMIN DE FER A VOIE NORMALE

SÉRIE E^n F^r ($\geqslant 40^m$)

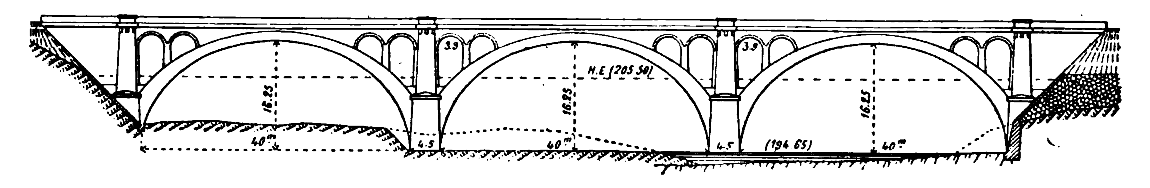
(Voir tableau synoptique I, p. 222 et monographies I, p. 225 à 230)

PONT SUR LE TARN A COURRIS *(TARN)* [1]

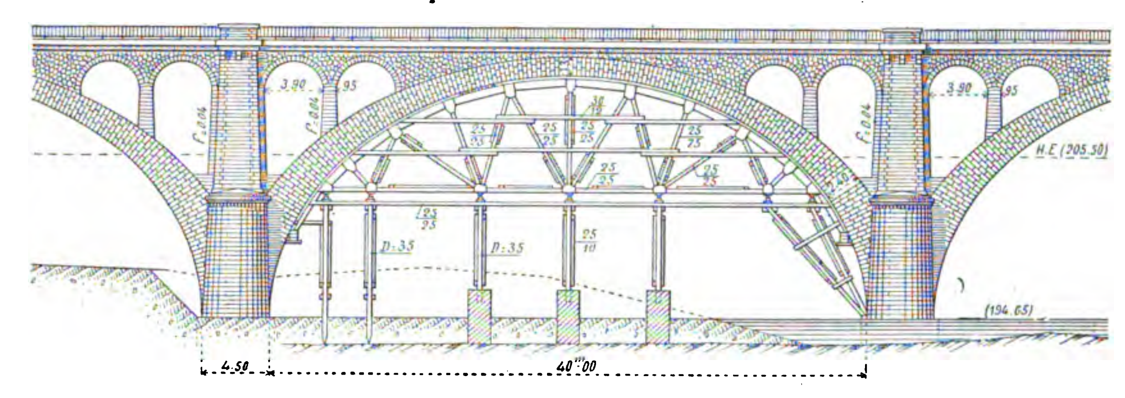
Ligne d'Albi à Saint-Affrique

1912-1916 E^n F^r ($\geqslant 40^m$)2

f_1 — Ensemble — $0^{mm}9$



f_2 — Arche centrale — 2^{mm}



1. Un seul cintre pour les 3 voûtes. — Le Tarn a eu là une crue de 10^m85 : pour ne pas l'encombrer, on n'a fait qu'un cintre.

Il est du type Antoinette. [2]

Sur ce cintre, on a d'abord construit le 1er rouleau d'une voûte de rive, (2 assises de moellons). *On a décintré*[3], puis on a transporté le cintre à l'autre rive ; on a, dessus, construit le 1er rouleau de la voûte, puis, celui de la voûte centrale.

1. — Voir tableau synoptique VI, p. 182.

2. — II, Pl. p. 144bis f_{16} — V, p. 139.

3. — En supposant au 1er rouleau 0^m875 à la clef, 1^m125 au milieu de la montée, la pression maxima avant le clavage du 2e rouleau y est (Méthode de M. Résal): 11^k à la clef (extrados) — 18^k au milieu de la montée (extrados).

Les deuxièmes rouleaux — faute d'approvisionnement — ont été faits longtemps après les premiers, d'abord celui de la voûte centrale, puis les autres.


Φ,. — 19 octobre 1915.



2. Dates d'éxécution du 1er rouleau des 3 voûtes.

	Voûte 3 (1913)	Voûte 1 (1914)	Voûte 2 (centrale) (1914)
Commencement....................	7 septembre	2 mars	26 juin
Fin..............................	17 octobre	20 avril	30 juillet
Décintrement......................	23 novembre	20 mai	10 septembre
Soit après	*37 jours*	*30 jours*	*43 jours*

3. Personnel.

Ingénieurs :

Projet : MM. Jannin et Aroles, Ingénieurs en Chef.

Travaux : M. Aroles, Ingénieur en Chef.

M. Barrère, Ingénieur ordinaire.

Entrepreneurs : MM. Bernard et Jean Fraisse.

SOURCE :

Renseignements gracieusement donnés par M. Barrère, Ingénieur des Ponts et Chaussées à Albi.

VOÛTES INARTICULÉES EN ARC PEU SURBAISSÉ

PONTS A UNE SEULE GRANDE ARCHE
SOUS CHEMIN DE FER A VOIE NORMALE

SÉRIE Â^{1} F^{r} ($\geqslant 40^{m}$)

(Voir tableau synoptique II, p. 122 et monographies II, p. 125 à 176)

PONT DE NIAGARA SUR LA RAUMA *(NORVÈGE)* [1]

Ligne de Dombaas à Aandalsnes

1914-19... Â^{1} F^{r} ($\geqslant 40^{m}$)^{12}

f$_{1}$ — Ensemble — 2^{mm}

1. — Voir tableau synoptique VI, p. 184.

SOURCE :

Dessins d'exécution et renseignements qu'a bien voulu me communiquer, en avril 1916, M. Otto Aubert, Ingénieur en Chef de la Construction des Chemins de fer de l'Etat, à Christiania.

PONTS A UNE SEULE GRANDE ARCHE SOUS CHEMIN DE FER A VOIE ÉTROITE

SERIE $\hat{A}^1 f^r$ ($\geqslant 40^m$)

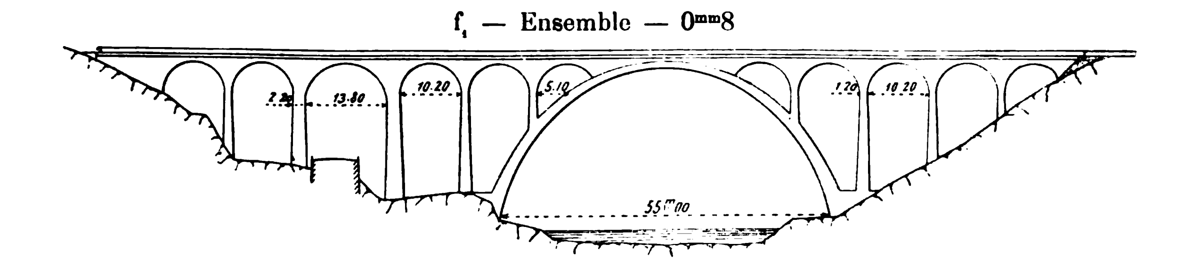
(Voir tableau synoptique II, p. 180 et monographies II, p. 183 à 196)

PONT SUR LA VOUGA
A POZO PRÈS DE PECEGUEIRO DO VOUGA *(PORTUGAL)* [1]

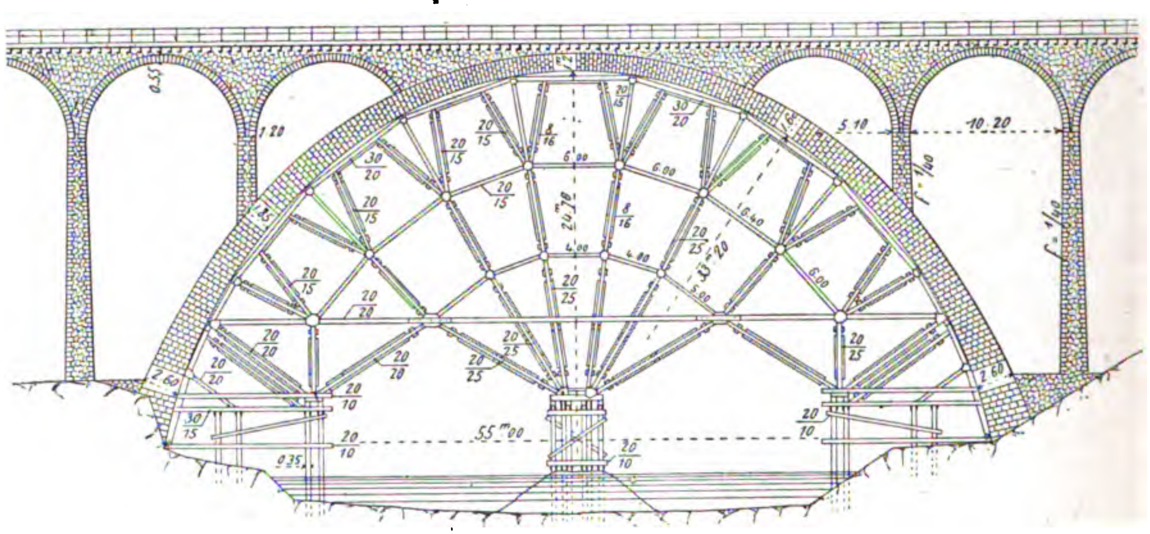
Ligne de Sarnada à Vizeu

Mars-Juillet 1913 $\hat{A}^1 f^r$ ($\geqslant 40^m$)[5]

f_1 — Ensemble — $0^{mm}8$



f_2 — Grande voûte — 2^{mm}



1. — Voir tableau synoptique VI, p. 184.

SOURCE :

Dessins et renseignements gracieusement communiqués par M. F. Mercier, Entrepreneur à forfait de la ligne de La Vouga.

PONT DE PÉLUSSIN *(LOIRE)* [2]

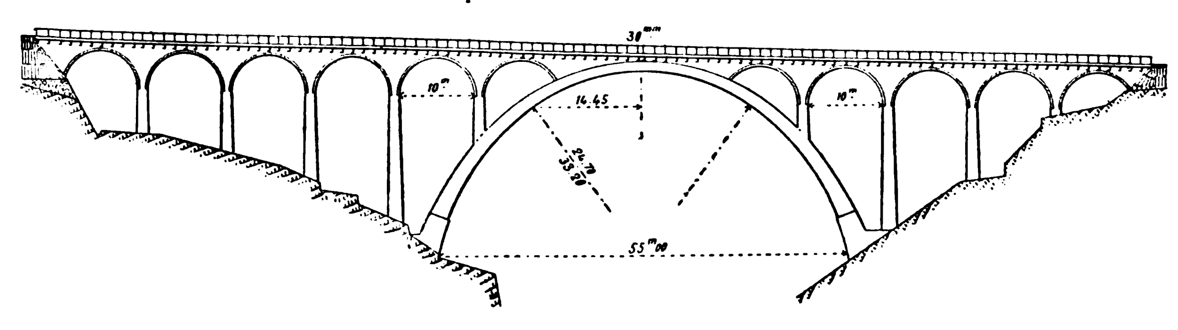
Ligne d'intérêt local de Pélussin à Maclas

Commencé en Juin 1914
Repris en Mai 1915
Terminé en Mars 1916

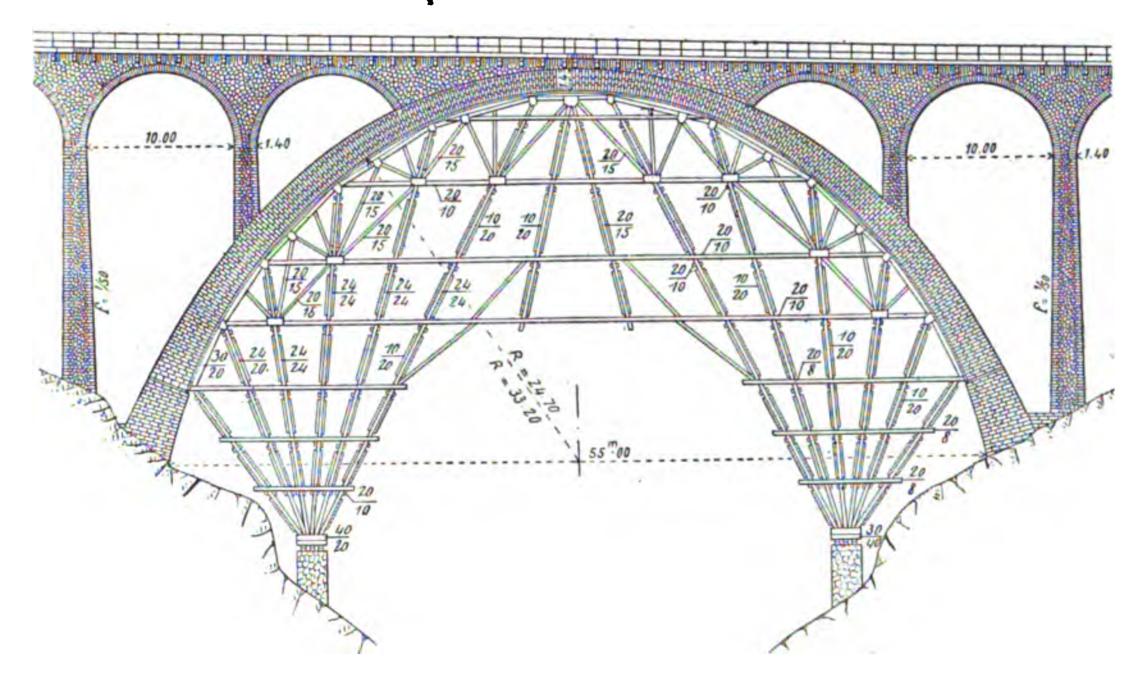
A[1] f[r] (⩾ 40m)[6]

(Voir monographies II, p. 183 à 196)

f_1 — Ensemble — 1mm



f_2 — Grande voûte — 2mm



2. — Voir tableau synoptique VI, p. 184.

SOURCE :

Dessins et renseignements qu'a bien voulu me donner M. F. Mercier, Président de la Société des Chemins de fer du Centre.

VOÛTES INARTICULÉES EN ARC ASSEZ SURBAISSÉ

PONTS EN DEUX ANNEAUX A UNE SEULE GRANDE ARCHE SOUS ROUTE [1]

SÉRIE $\widehat{A}^1$ $\widehat{A}^1$ r^{te} ($\geqslant 40^m$)

(Voir tableaux synoptiques III, p. 16, II, p. 64 et monographies III, p. 19 à 70, II, p. 67 à 114)

PONT SUR LE LOT A VILLENEUVE *(LOT-ET-GARONNE)* [2]

Route et ligne d'intérêt local de Villeneuve à Villeréal

1914-1916 $\widehat{A}^1$ $\widehat{A}^1$ r^{te} ($\geqslant 40^m$)[1]

1. Pont en 2 anneaux. — L'ouvrage est en 2 anneaux de 3^m03 de largeur, distants de 4^m90, retombant sur 2 culées de 4^m perdues dans le terre-plein du quai.

Sur les arcs, s'appuyent des piles en béton armé revêtues de briques, portant le tablier en béton armé, entretoisées le long des tympans par des pleins cintres en béton armé, revêtus de briques.

2. Fibre moyenne et intrados des grandes voûtes. — La fibre moyenne est un funiculaire des charges mortes; rapportée à une tangente au sommet, elle a pour équation :

$$y = 0{,}47619\left(\frac{x}{10}\right)^2\left[1 + 0{,}00681819\left(\frac{x}{10}\right)^2 + 0{,}0000161006\left(\frac{x}{10}\right)^4\right]$$ [3]

Pour une montée de 13^m054, sa portée est de 96^m86 : son rayon de courbure à la clef est de 105^m.[4]

Normalement à cette fibre moyenne, on a porté les 1/2 épaisseurs calculées et on a tracé, au sentiment, l'intrados. A partir de 44^m de la clef, c'est un arc de 15^m, puis de 5^m44 de rayon.

1. — Ponts sous route en 2 anneaux, de 40^m de portée et plus :
en ellipse à plusieurs grandes arches, I, p. 188 à 207 — Pont des Amidonniers;
en arc peu surbaissé, à une seule grande arche, II, p. 60 à 114 — Ponts de Luxembourg p. 67, de Walnut Lane, p. 83 — sur la Rocky River, p. 95 — de Constantine, p. 107.

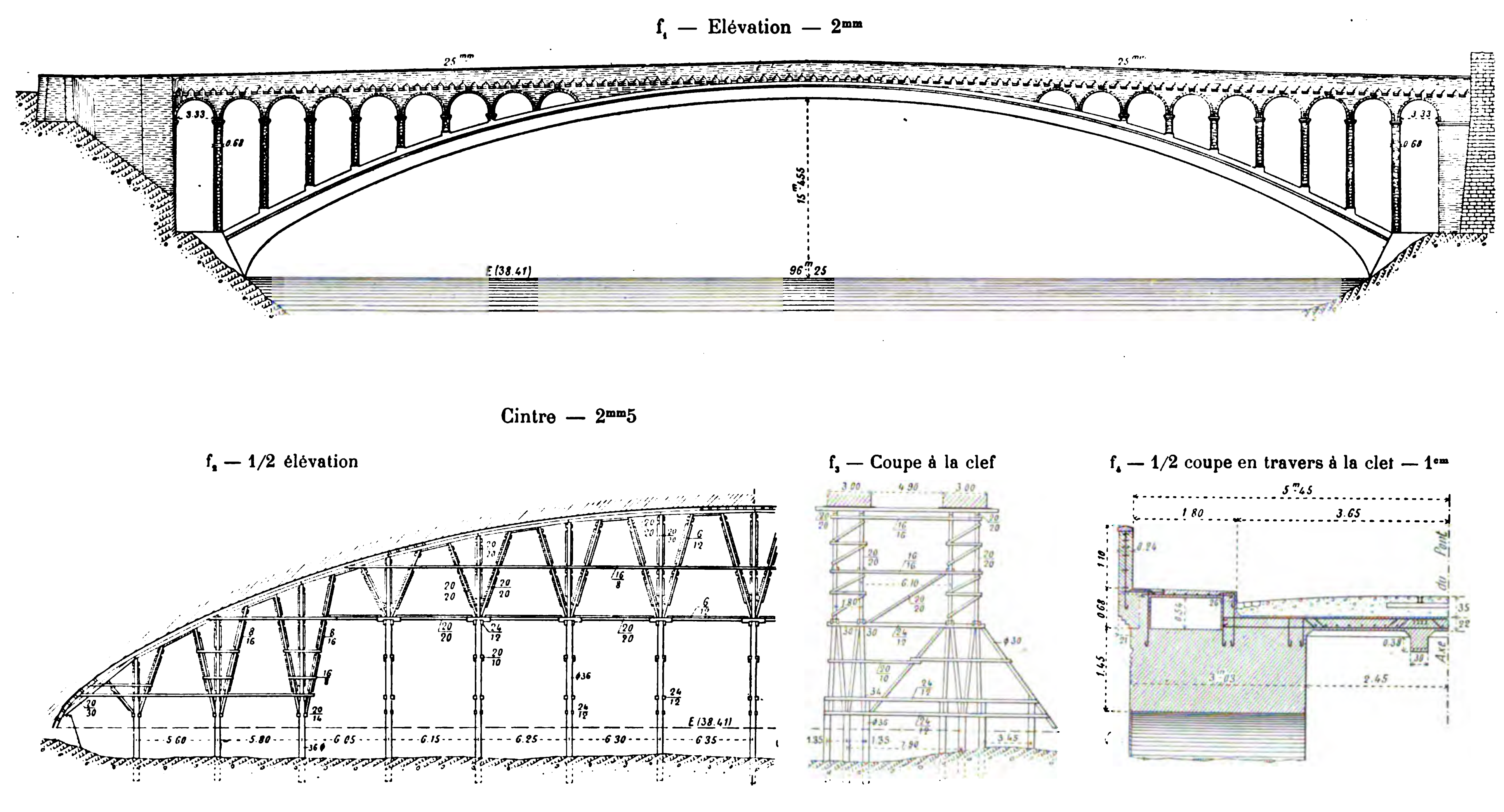
2. — Voir tableau synoptique VI, p. 186.

3. — Elle est à moins de 0^m009 de la courbe : $Y = \frac{13{,}054\left[\overline{129}^2 - \overline{48{,}43}^2\right]}{\overline{48{,}43}^2} \times \frac{x^2}{\overline{129}^2 - x^2}$ (III, p. 337, 366).

4. — C'est celui de l'intrados du Pont de Plauen (III, p. 14, 52).

PONT DE VILLENEUVE

f_1 — Elévation — 2mm



Cintre — 2mm5

f_2 — 1/2 élévation

f_3 — Coupe à la clef

f_4 — 1/2 coupe en travers à la clef — 1cm

3. « **Matériau** » **des grandes voûtes.** — **Elles sont en béton, au dosage de 350^k de ciment pour 1^mc de gravier « tout venant » du Lot.** [5, 6, 7]

4. Parapet (Projet). — **Le parapet, en briques, de 0^m24 d'épaisseur, sera armé. Il reposera sur une file de corbeaux portant des mitres en briques, comme on en voit à de vieux monuments de Toulouse.**

5. — Pour les voûtes en béton, voir V, p. 23 à 28.

6. — Voici les résultats des essais faits à l'École des Ponts et Chaussées, à 90 jours, sur des cubes de 20^c de béton de mêmes éléments (Procès-verbal du 16 juin 1915) :

Poids en kg du ciment pour 1^mc en œuvre		200^k	250^k	300^k	350^k	400^k	450^k	500^k	550^k	600^k
Charge par 0^m01²	1re fissure	171	173	270	411	438	484	550	495	472
	écrasement	185	243	332	457	515	544	626	567	602

7. — Les Compagnies de l'Est et du Nord ont fort judicieusement refait en béton des voûtes ruinées en août et septembre 1914 : elles n'auraient pas eu à temps des moellons.

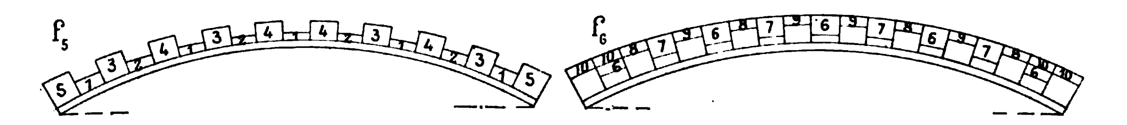
Voici les ingénieuses dispositions imaginées par M. Descubes, Ingénieur en Chef de la Voie de l'Est : là où les débris des ouvrages encombrent le lit des rivières, il est fort difficile de placer les cintres usuels. On courbe de vieux rails* — mieux des cornières assemblées, plus faciles à courber — on les noie dans 20^c à 25^c de béton.

Ce rouleau-cintre s'appuie sur des retombées bien dressées ; il restera dans la voûte.

Pour un pont sur la Meurthe à Raon-l'Etape, ligne de Lunévillle à Saint-Dié, à 2 arcs de 18^m35 surbaissés à 1/7,46, on a ainsi bétonné (mars-avril 1915) :

à peu près tous les mètres, on pose sur le cintre, normalement à la fibre moyenne, des grillages en fil de fer raidis par des fers ronds ou des cornières : on coule le béton dans 4 alvéoles à la fois, répartis de façon à charger uniformément le rouleau-cintre (lequel est déformable) — alternativement sur le 1/3 et sur les 2/3 de l'épaisseur de la voûte (f_5) ; on fait de même pour le 2e rouleau (f_6). Les voussoirs se soudent à travers les mailles des grillages.

Les deux arches ont été bétonnées en deux jours.



La Compagnie du Nord a refait en béton :

les 3 voûtes du pont de Laversine sur l'Oise (ligne de Paris à Creil), 3 voûtes biaises à 50° de 28^m66 de portée biaise, à peu près en plein cintre sur leur section droite, sur cintres retroussés rigides, en 2 rouleaux sans joints vides ; le premier du 1/3 de l'épaisseur, coulé en 48 heures. On a noyé dans le béton 2 quadrillages de fers ronds de 22^mm à l'intrados et à l'extrados, réunis par des étriers en barres de 14^mm (environ 40 kil. d'acier par m. c de béton). — Dosage du béton, 350 kil. de ciment par m. c (février-avril 1915).

Projet et direction des travaux : M. Candelier, Ingénieur en Chef de la Compagnie du Nord, avec le concours de MM. Rabut, Inspecteur Général des Ponts et Chaussées et Freyssinet, Ingénieur des Ponts et Chaussées.

Entrepreneur : M. F. Mercier, à Moulins.

6 arches du viaduc de Poix** (ligne d'Amiens à Rouen) : pleins cintres de 16^m50 ; les premières ont été construites par tranches en béton à 200 kil., les dernières par rouleaux en béton à 300 kil. (novembre 1914-mai 1915).

Direction : M. Candelier, Ingénieur en Chef de la Compagnie du Nord.

Projet : M. Freyssinet, Ingénieur des Ponts et Chaussées, en congé.

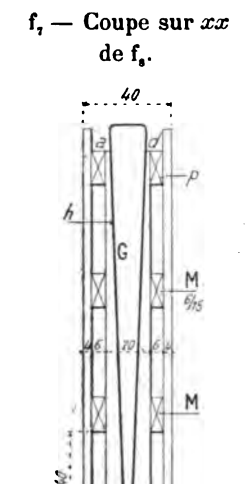
Entrepreneur : M. Graveron.

* L'idée première du cintre en rails noyés dans la voûte est de M. Valat, Ingénieur Principal de la Compagnie de l'Est.

** VI — p. 64, renvoi 69.

5. Exécution des grandes voûtes. — Sur le cintre, le long des bandeaux, on a monté des masques latéraux très solides, sur lesquels on a cloué des liteaux pour dessiner les moulures — puis au droit de chaque appui du cintre, un coffrage réservant un vide de 0^m40 (f_7, f_8).

f_7 — Coupe sur *xx* de f_8.



Coffrage entre 2 tranches (0^m03 p. m.)

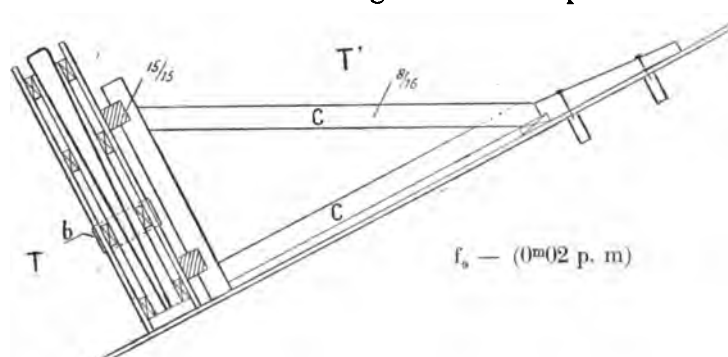
f_8 — Vue par dessus

G — Coin en bois entouré d'un feuillard *h* de 6^{mm}, suiffé.

G' — Contre-coin en bois : sur les faces *ab, cd,* feuillard de 2^{mm}.

p — Planches de 4^{cm} placées normalement à la douelle.

Pendant qu'on remplissait une tranche T (f_9), le coffrage était tenu par un chevalet amovible CC qu'on enlevait ensuite et qu'on plaçait plus haut pour tenir le coffrage supérieur de la tranche suivante T'.



f_9 — (0^m02 p. m)

Les voûtes étaient ainsi divisées en tranches entourées d'une caisse étanche et solide : ces tranches avaient environ 5^m60 de long ; elles cubaient de 25 à 40^{mc}. On remplissait une caisse par jour, par couches de 0^m20 parallèles à la douelle : le béton était damé par trois pilonneuses à air comprimé ; il était peu mouillé.

Contre les masques de tête, sur 0^m20, le béton n'avait pas de cailloux de plus de 3^{cm} ; il était dosé à 600 kg par mètre cube et un peu plus mouillé : on avait ainsi un parement plus compact, résistant mieux aux intempéries.

On a monté les deux arcs des retombées à la clef : on faisait une tranche sur l'un, puis la même tranche sur l'autre.

Pour empêcher une tranche T' de glisser sur le cintre (f_9), on la retenait, au tiers de la hauteur du joint à partir de l'intrados, par des butons *b* en béton fretté de 0^m20 de diamètre, qui traversaient le coffrage pour s'appuyer sur la

tranche inférieure T [8] : on les noyait ensuite dans le béton.

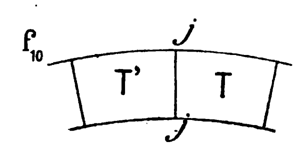
On laissait le béton durcir 48 heures, puis, on « décoffrait », en « décollant » les coins G (f_1) : on réemployait les bois aux joints suivants.

Pendant l'exécution d'une tranche, l'appui en arrière tassait d'environ 2^{cm} : moins, pendant celle de la tranche suivante. Dans un cintre à poteaux et contre-fiches, les déformations d'un appui sont indépendantes de la charge sur les autres [9].

Toutes les tranches faites, on a rempli les vides entre elles avec le même béton bien pilonné.

6. Décintrement. — On a décintré, par un procédé fort ingénieux, inventé par l'auteur du projet M. Freyssinet, et éprouvé par lui à des arcs en béton armé [10].

Au lieu d'abaisser le cintre sous les voûtes, on soulève les voûtes au-dessus du cintre, en écartant l'une de l'autre les demi-voûtes de part et d'autre de la clef par des vérins hydrauliques assez puissants pour y produire un effort égal à la poussée qui serait créée par le décintrement [11].



Supposons exécutée la dernière tranche T' de la demi-voûte de gauche (f_{10}) : on enlève le coffrage qui maintenait le joint de clef *jj*, on graisse ce joint pour que le béton de T n'y adhère pas, et, contre lui, on exécute la tranche T. L'arc est ainsi coupé à la clef par un joint *jj* sans épaisseur.

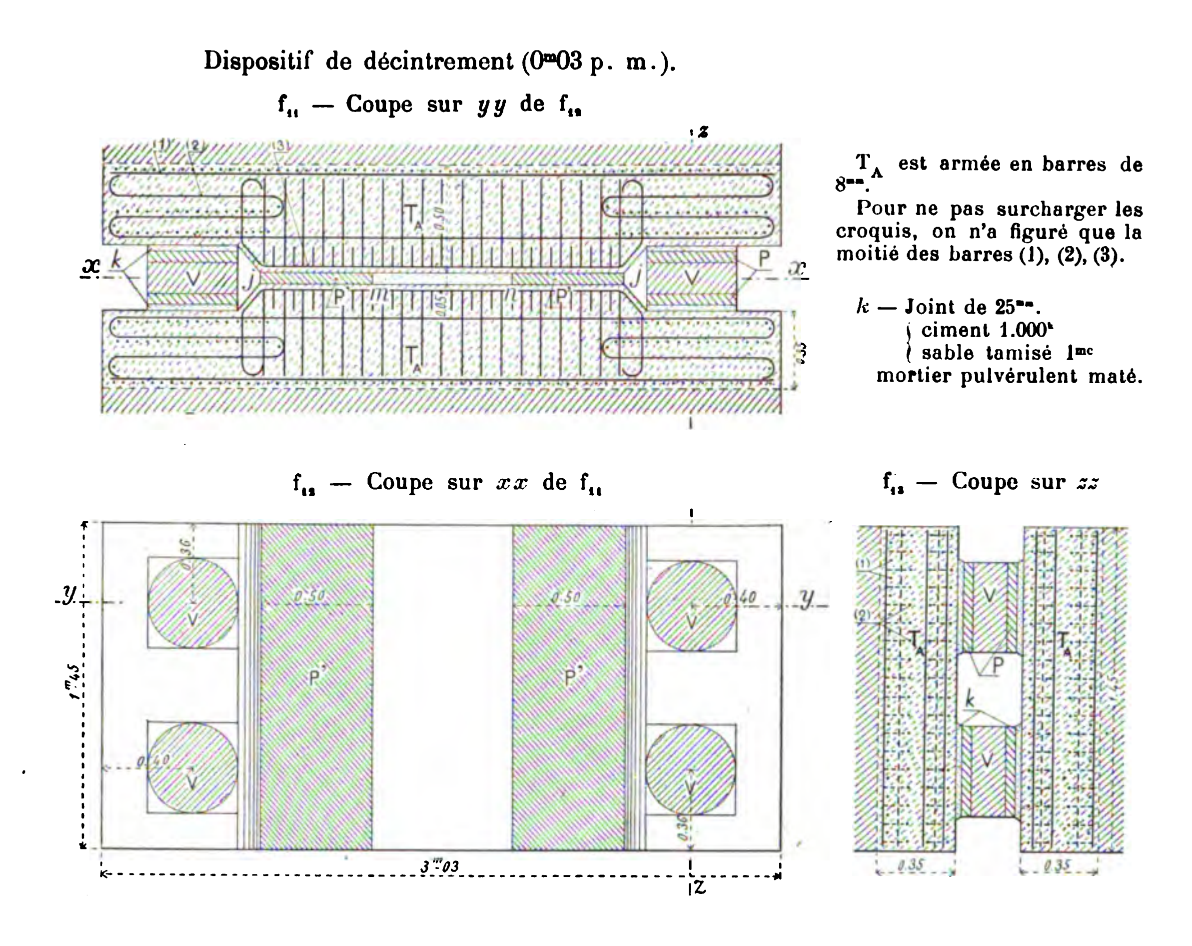
8. — Voir ce qui a été fait pour retenir les tranches au pont de Walnut Lane II, p. 90.

9. — V, p. 135, 137.

10. — Arc à deux articulations (portée 50^m, montée 2^m) que M. F. Mercier, Entrepreneur, a fait construire à Moulins en 1908, à titre d'expérience : on l'a décintré en y enfonçant des coins à la clef.
Ponts en béton armé sur l'Allier : du Veurdre 1910 (3 arcs de 72^m56 et 67^m surbaissés au 1/15, (1910) — de Boutiron, (1912). Entrepreneur à forfait M. F. Mercier.

11. — Dans un mémoire inséré aux Annales des Ponts et Chaussées d'octobre 1881, p. 472, j'indiquais que le système des clavages multiples matés « crée entre les voussoirs des clavages des réactions *qui soulagent le cintre et préparent le décintrement.* »
Dans son rapport du 20 juin 1913 sur les projets présentés pour le pont de Villeneuve, M. l'Ingénieur en Chef Bory fait cette observation :
« Il convient de remarquer ici que le système de décintrement très particulier qui sera employé au « pont de Villeneuve n'est que l'application systématique de ce dernier principe.
« On crée à la clef des réactions, non par le clavage et le matage du joint, mais par l'action de vérins « hydrauliques. Le principe reste le même et les moyens sont différents. »

Dans des vides ménagés à la clef à chaque tête, on a placé quatre vérins V capables chacun de 500^T (f_{11}, f_{12}, f_{13}) : ils pressaient par des plaques d'acier P de 5^c d'épaisseur des tranches T_A en mortier à 1.000 kg de ciment par mètre cube, tenu par une armature à mailles serrées.



Sous une pression de 260^T par vérin [12], le joint vide *jj* (f_{10}, f_{11}) s'est ouvert de 2^c environ sans soulèvement au-dessus du cintre, puis, la pression atteignant 270^T, de 8^c à l'extrados, de 7^c à l'intrados, avec un soulèvement d'environ 9^c au-dessus du cintre.

Dans le joint ainsi ouvert, on a introduit deux plaques en mortier P' (f_{11}, f_{12}) armées d'un quadrillage à mailles serrées, de 5^c d'épaisseur à faces parallèles, garnies sur chaque face d'un enduit frais de pâte de ciment pur de 3^{mm}.

On a laissé échapper l'eau des vérins. Le joint ouvert s'est refermé sur les plaques P' : l'écartement de ses faces est devenu uniforme et égal à 53^{mm}, le soulèvement au-dessus du cintre était réduit à 5^c. Entre les 2 plaques P' (c'est-à-dire en *mn* de f_{11}), on a maté du mortier pulvérulent de ciment.

12. — Soit 1.040^T pour les 4. La poussée calculée de l'arc nu était 1.035^T, soit 24 k. $/\overline{0^m01}^2$.

Cet allongement artificiel de 53^{mm} de la fibre moyenne primitive compense :

1° le raccourcissement par compression de l'arc, sous son poids ;

2° le recul des appuis ;

3° le retrait, réalisé avant le décintrement ou à prévoir après.

Les cales P' introduites à la clef, en supprimant les couples de flexion dus aux raccourcissements, réduisent et égalisent les efforts maxima.

Malgré la précision des mesures, on n'a pu constater de déplacement latéral dû au flambement.

Par contre, en refermant le joint de clef sur des cales d'épaisseur inégale, on a provoqué des déplacements latéraux : on les a fait ensuite disparaître, en refermant sur des cales d'égale épaisseur.

Φ_1. — Février 1916. [13]



7. Dates d'éxécution.

1914, février-mars : on commence les travaux, — au moment de la guerre, on a fait la fouille de la culée gauche, on commence à monter le cintre; — octobre : la culée gauche est fondée, le cintre presque monté.

1915, janvier : on suspend les travaux; — juillet : on les reprend, on répare les dégâts causés au cintre par les crues ; on pose le platelage et les coffrages ; on fonde la culée droite — 1er septembre : on pose la première tranche; — 28 octobre : on pose la dernière; — 29 octobre - 5 novembre : on clave; — 6 décembre : décintrement.

13. — Photographie qu'a bien voulu nous adresser M. Mercier.

8. Personnel.

Projet et entreprise.

On avait ouvert un concours « entre les constructeurs spécialistes de béton armé, préalablement agréés ».

On a adopté les propositions de MM. F. Mercier et Cl. Limousin (forfait de 430.000 fr.).

Le projet a été dressé par leur bureau d'études sous la direction de M. Freyssinet, Ingénieur des Ponts et Chaussées, en congé, qui en a imaginé toutes les dispositions.

Examen des projets et contrôle :

M. Bory, Ingénieur en Chef des Ponts et Chaussées, à Agen.
M. Boulzaguet, Ingénieur à Villeneuve.

9. Ce qu'enseigne le pont de Villeneuve. — Comme portée, les 2 voûtes de Villeneuve (96^m25) qui sont en béton, dépassent la plus grande voûte actuelle en maçonnerie, celle de Plauen qui a 90^m [14] : ce sont aujourd'hui les plus grandes du monde [15, 16].

La largeur à la clef y a été réduite à 3^m03, soit environ le 1/32 de la portée, sans flambement.

On les a construites sur cintre à poteaux et contrefiches.

On les a décintrées sans appareil de décintrement sur le cintre, en les comprimant à la clef par des vérins et maintenant ensuite par une cale en béton armé le joint ouvert par les vérins.

14. — III p. 14, 52.

15. — Au tome V. p. 207 renvoi 13, on a fait connaître qu'on venait de commencer les fondations de la voûte en béton du Bernand de 173^m de portée ; à cause de la guerre, on a dû y renoncer.

16. — Pour le classement des voûtes de 40^m et plus, voir V. p. 200 à 206.

SOURCE :

Dessins et renseignements gracieusement communiqués par M. Freyssinet.

PONTS A UNE SEULE GRANDE ARCHE SOUS CHEMIN DE FER A VOIE NORMALE

SÉRIE $\hat{A}^1$ F^r ($\geqslant 40^m$)

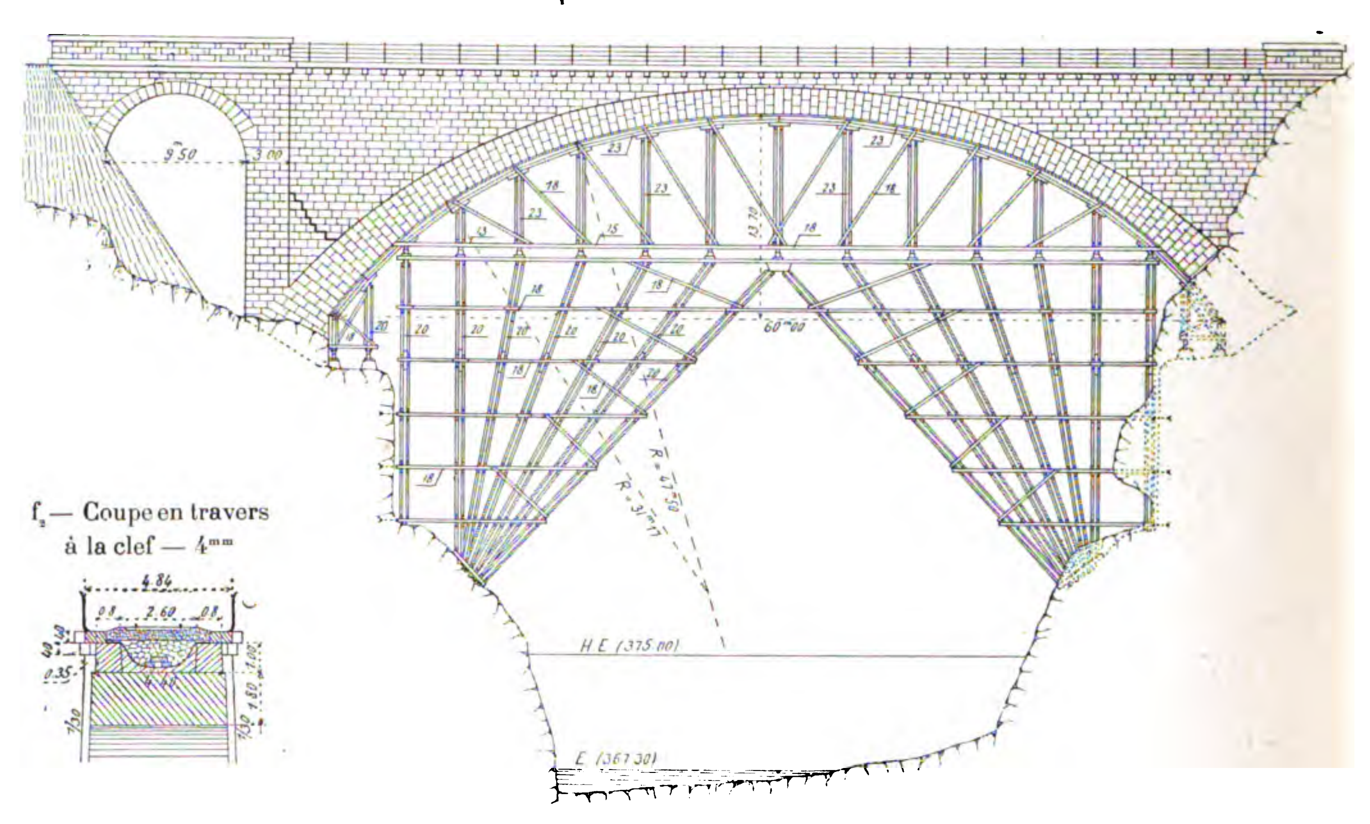
(Voir tableau synoptique III, p. 90 et monographies III, p. 93 à 168).

PONT SUR L'ORKLA, A ORKLA (*NORVÈGE Drontheim*) [1]

Ligne d'Orkla à Stören

1912-1915 $\hat{A}^1$ F^r ($\geqslant 40^m$)^{26}

f_1 — Elévation — 2^{mm}



f_2 — Coupe en travers à la clef — 4^{mm}

1. — Voir tableau synoptique VI, p. 186.

SOURCE :

Dessins d'exécution et renseignements qu'a bien voulu me communiquer, en avril 1916, M. Otto Aubert, Ingénieur en Chef de la Construction des Chemins de fer de l'Etat, à Christiania.

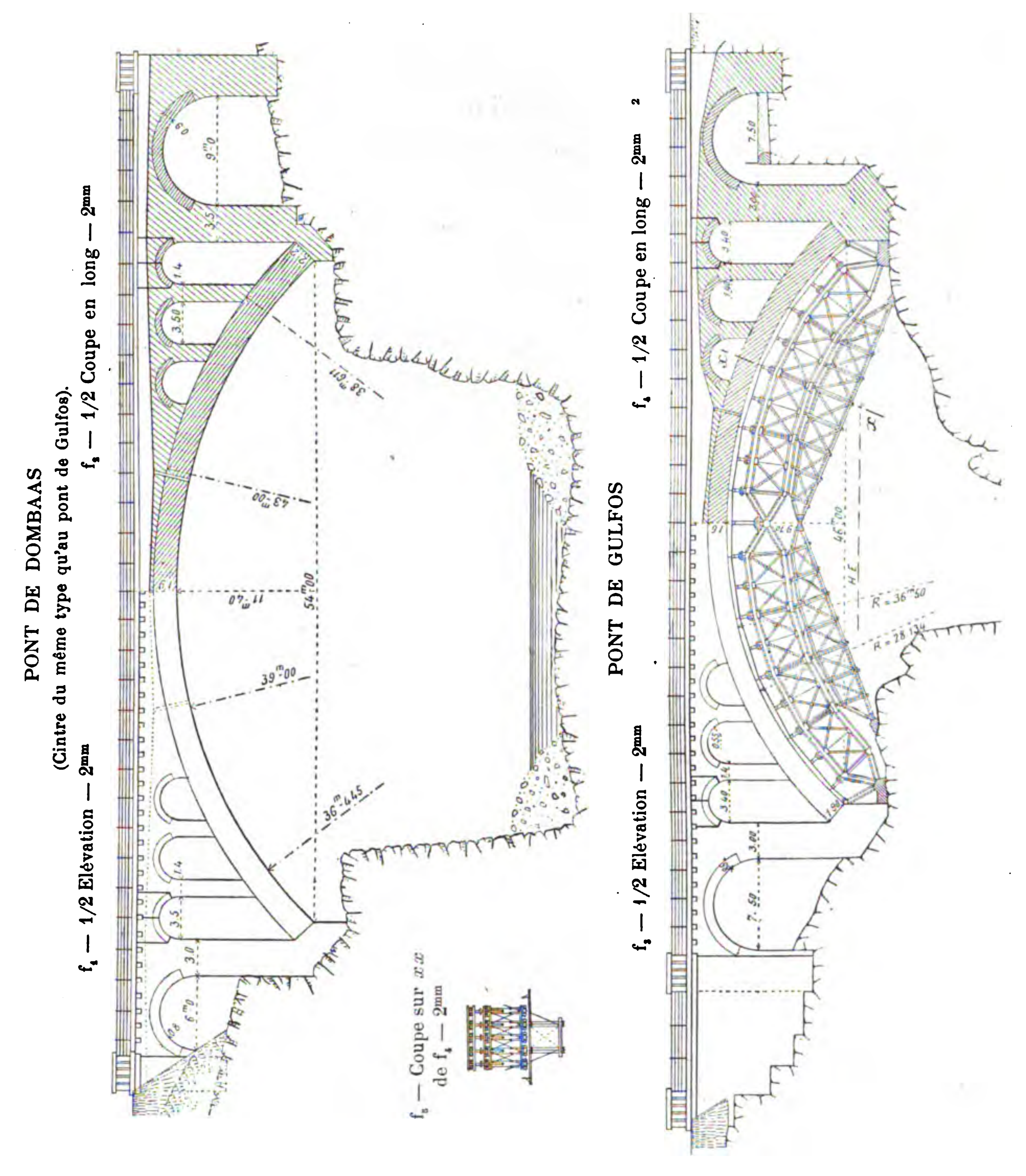
2 PONTS EN NORVÈGE :

SUR LA JORA, A DOMBAAS,[1] *ligne de Dombaas à Aandalsnes;*

DE GULFOS,[1] *ligne de Trondhjem à Stören.*

1913-19.. $\hat{A}^1$ F^r ($\geqslant$ 40^m)^{27}, $\hat{A}^1$ F^r ($\geqslant$ 40^m)^{28}

(Voir monographies III, p. 93 à 168).



1. — Voir tableau synoptique VI, p. 186. 2. — Voir le cintre de Svenkerud III, p. 151.

SOURCE :

Dessins d'exécution et renseignements qu'a bien voulu me communiquer, en avril 1916, M. Otto Aubert, Ingénieur en Chef de la Construction des Chemins de fer de l'Etat, à Christiania.

VOÛTES INARTICULÉES ⩾ 40m EN BÉTON PEU ARMÉ [1]

(Voir tableau synoptique III, p. 286 et monographies III, p. 289)

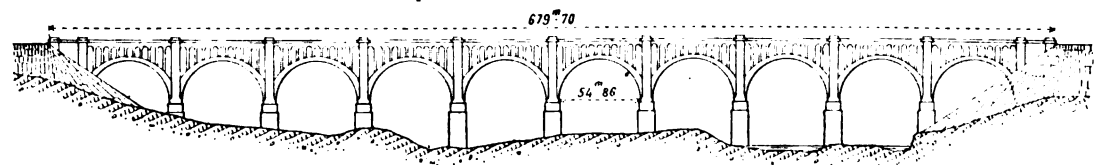
PONT SUR LE TUNKHANNOCK CREEK

PRÈS DE NICHOLSON *(ÉTATS-UNIS Pennsylvanie)* [2]

Ligne de Scranton (Pennsylvanie) à Elmira (New-York)
(Delaware, Lackawanna and Western RR)

1912-1915

f_1 — Ensemble — 0mm2



1. Importance de l'ouvrage. — 10 arches en plein cintre [3] de 54m86 [4] à 73m au-dessus de l'eau, — 679m70 de longueur; quelques piles fondées à 30m dans le sol — environ 125.000mc de béton, 1000T d'acier pour l'armer, 33.000mc de déblai en fondation. C'est un des plus grands ouvrages en maçonnerie [5].

Φ_1 — 1915.



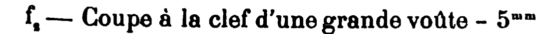
1. — Pour les grandes voûtes en béton peu armé, voir III, p. 284 à 303.

2. — Voir tableau synoptique VI, p. 188.

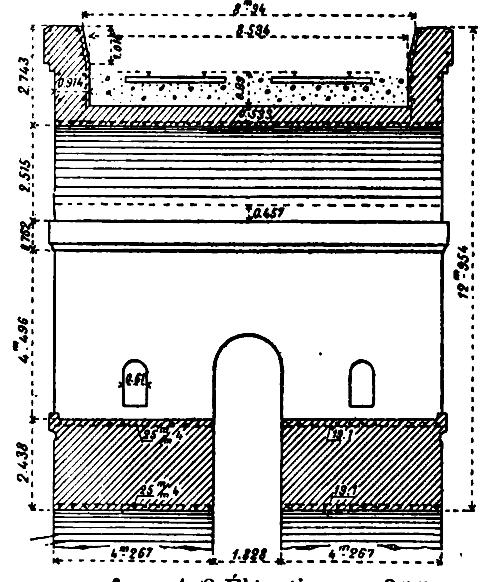
3. — Voir la Série Cr F' (⩾ 40m) Tome I, p. 76 à 82.

4. — Pour les voûtes complètes — pleins cintres ou ellipses — il semble qu'on se veuille limiter à 55m : le plus grand plein cintre (Ballochmyle, I, p. 38, 41) a 55m17 ; les plus grandes ellipses surbaissées (Annibal, I, p. 88, 112 — Diable, I, p. 88, 116), la plus grande ellipse surhaussée (Wiesen, I, p. 232, 235) ont 55m.

5. — « The largest of its kind in the World » (S, p. 484).



f_2 — Coupe à la clef d'une grande voûte - 5mm

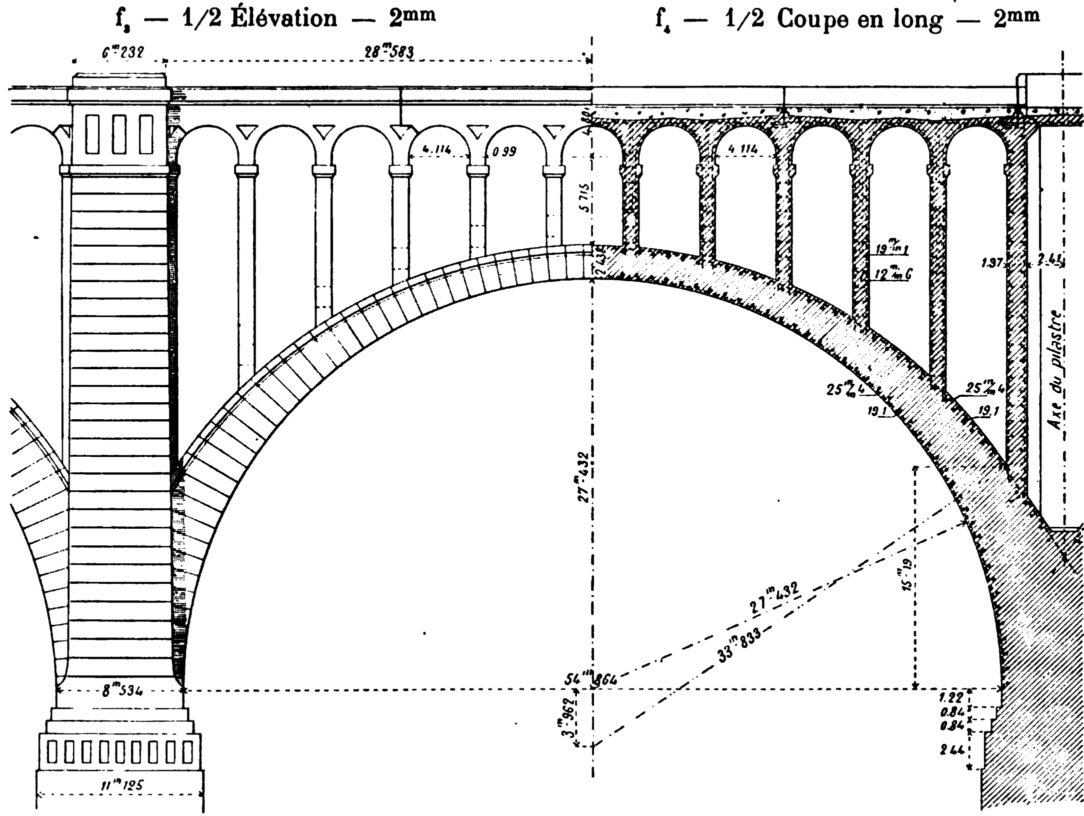


f_3 — 1/2 Élévation — 2mm

2. Voûtes en 2 anneaux (V. p. 67) f_2. — Type Luxembourg appliqué aux États-Unis aux ponts de Walnut Lane[6], Rocky River[7], Spokane[8]. On n'avait encore fait ainsi que des arcs sous route : ici, ce sont deux ponts accolés en plein cintre, dont chacun porte une voie[9].

3. Voûtes en béton. — Après de longues estimations comparatives, on a adopté le béton de préférence à l'acier, moins cher à entretenir, plus durable, résistant mieux à une augmentation de surcharge, à un déraillement, plus

f_4 — 1/2 Coupe en long — 2mm



6. — II, p. 83. 7. — II, p. 95. 8. — III, p. 284, 293.

9. — On achève un viaduc en béton, sous route, long de 526m, large de 23m25, sur le Big Creek à Cleveland (Ohio). Il a 10 arches principales, dont 6 de 39m014 de portée, 13m106 de montée, en anse de panier (arc avec raccordement vertical aux naissances); chaque arche est en 4 anneaux parallèles en béton ; ils ont 1m10 à la clef, 1m83 aux naissances; les anneaux de têtes sont larges de 1m829, les 2 autres de 2m134. Le vide entre les anneaux est de 3m505 aux têtes, de 2m743 au milieu. Les piles et le tablier sont armés. Les tympans sont élégis par de petits pleins cintres : celui qui est au-dessus d'une pile est coupé à la clef par un joint de dilatation. Comme il fallait maintenir la circulation sur un viaduc métallique qui coupe le nouveau, on a construit le nouveau par deux moitiés longitudinales : cintres d'acier, fermes à 3 articulations ; on construisait à la fois deux anneaux de 6 arches consécutives. En 7 à 8 jours on bétonnait une paire d'anneaux. On arriva à couler, à une arche de 39m, 245mc de béton en 1 jour — à une pile, 412mc de béton en 9 heures.

(Engineering News — 9 septembre 1915 — Fast Concreting on Brooklyn-Brighton Viaduct — Cleveland).
Génie Civil 15 janvier 1916.

vite fait quand les usines sont débordées de commandes (S_1 p. 482).[10, 11]

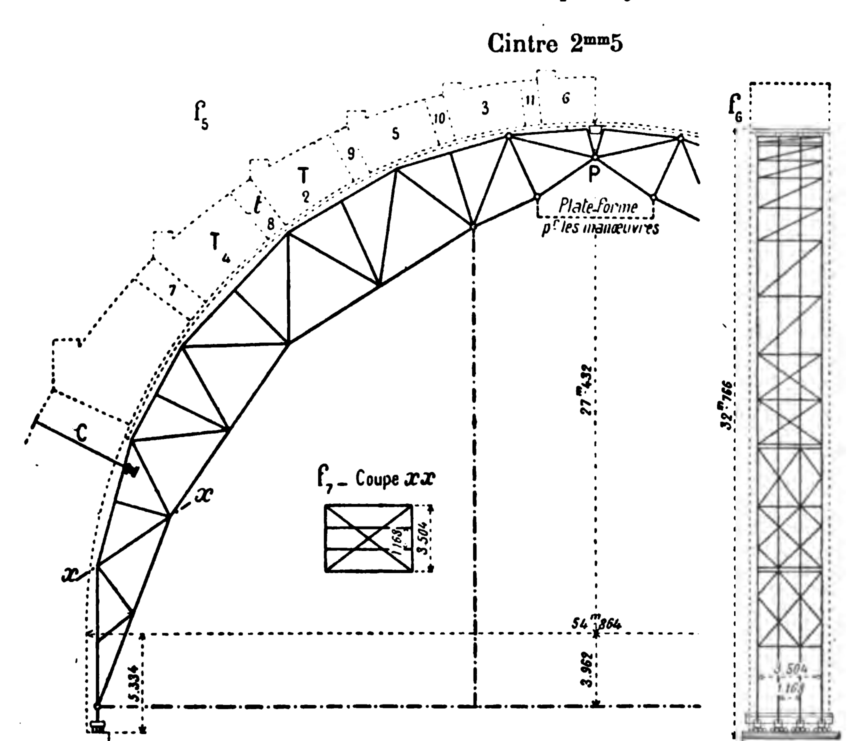
La courbe de pression s'écarte peu de la fibre moyenne.

Les voûtes sont légèrement armées en long et en travers près de l'intrados et de l'extrados pour résister aux efforts dus aux changements de température ; on a fait ainsi aux ponts sur la Delaware[12], de Spokane[8].

4. Fondations des piles centrales. — On descendait un caisson sans fond de 13m × 15m, dont les parois étaient faites de palplanches d'acier de 0m30 de largeur, 9m15 de longueur. On les battait, on creusait — puis on achevait de les enfoncer.

Ensuite, à 1m45 extérieurement à ce premier caisson, on en battait un second. Quand ses palplanches étaient enfoncées de 3 ou 4m, on déblayait à la main entre les deux, on enfonçait les palplanches du caisson intérieur — puis celles du caisson extérieur.

5. Pose du béton des piles en élévation. — Le béton (ciment 1 — sable 3 — cailloux de 5cm, 5) était posé jour et nuit sans arrêt, par couches de 1m20, dans des panneaux en bois de 5m40 de hauteur reliés par des tirants au béton mis en place. Par le froid, on faisait le béton à l'eau chaude, on réchauffait à la vapeur le sable et les cailloux.

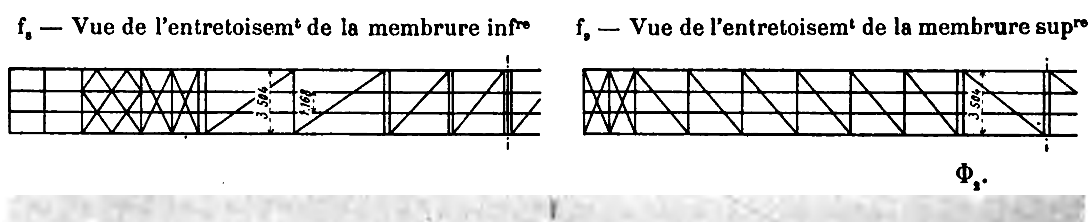


On a noyé dans le béton environ 11 °/o de grosses pierres, surtout à la surface des couches successives de 1m20.

6. Béton des grandes voûtes — Cintres. — Jusqu'à 10m au-dessus des naissances, le béton était posé dans des formes en bois, en encorbellement de 2m13 sur les naissances, au delà, sur des fermes d'acier articulées aux naissances et au cerveau (f_6) [13, 14].

10. — V, Titre I, p. 189 à 198.
11. — Pour les voûtes en béton, voir Tome V, p. 23 à 28.
12. — III, p. 284, 289.
13. — Sur les cintres métalliques, voir V, p. 151.
14. — Comme aux ponts de Rocky River (II, p. 101), de la Delaware (III, p. 291).

f_8 — Vue de l'entretoisem[t] de la membrure inf[re] f_9 — Vue de l'entretoisem[t] de la membrure sup[re]

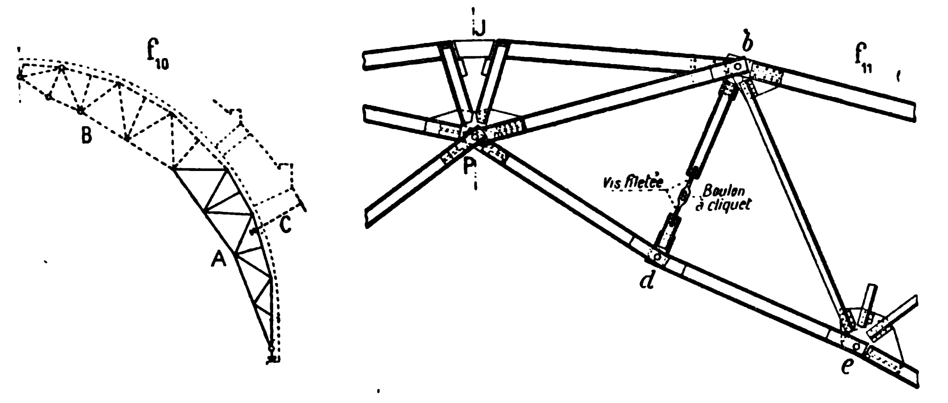


Φ_2.



Chaque demi-ferme porte 286[T] et pèse 24[T]5.

On montait d'abord la retombée A (f_{10}) en la soutenant par deux barres filetées C, de 40[mm], prises dans le béton. En agissant sur l'écrou de C, on mettait en place la retombée A, puis, dessus, on attachait B.



Le dernier panneau P*ebd* (f_{11}) est articulé à ses 4 sommets : la longueur *bd* de sa diagonale est réglée par une tige filetée, laquelle permet de mettre à sa place le cerveau du cintre pour faire la voûte, et de l'abaisser pour décintrer[15]. En J, au-dessus de l'articulation P, un coin en chêne fixe le cintre. A la clef et au 1/4 de la hauteur, étaient attachés des haubans fixés au sol.

15. — Voir III, p. 291.

Les voûtes ont été exécutées par tranches T séparées par des intervalles *t* clavés plus tard : f_8 indique l'ordre de pose des T et des *t*. On posait les clefs *t* assez longtemps (7 jours au moins) après les T pour que le béton des T eût fait son retrait (S_2'').

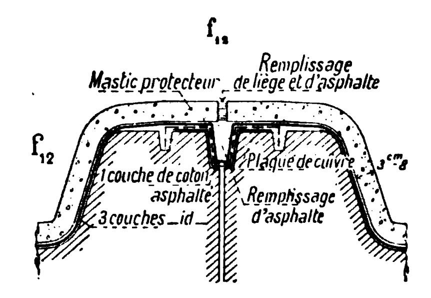
Le montage des cintres fut commencé le 23 septembre 1913 : le cintre de la première voûte, pesant 200^T, fut levé en 8 jours.

Le cintre était ripé d'un anneau sous l'autre d'une même arche, sur 6 rouleaux de 15^{cm} roulant sur un chemin de 10^m82 de longueur, porté par des poutres en **I** de 0^m20.

On faisait avec 5 cintres 5 anneaux consécutifs — puis on les déplaçait transversalement de 6^m et on faisait les 5 anneaux jumeaux — alors on les démontait, on les transportait à l'aide des 2 transporteurs à câbles[16].

7. Chape.

— 3 feuilles de coton asphalté, puis 2 couches de 19^{mm} de mastic d'asphalte (S_2'').



8. Joints de dilatation coupant les arches d'évidement.

— 4 par grande voûte : 2 près des piles, 2 vers le 1/4 de la portée. Le croquis f_{11} indique comment le joint était protégé pendant qu'on faisait la chape, et comment est assurée la continuité de la chape quand le joint s'ouvre.

9. Personnel.

Ingénieurs :

Section technique de la Delaware Lackawanna and Western Railroad Cy.

MM. G. J. Ray, Ingénieur en Chef.

F. L. Wheaton, Ingénieur de la construction de la ligne de Martin's Creek.

A. B. Cohen, Ingénieur, chargé du bétonnage.

C. W. Simpson, Ingénieur attaché au viaduc.

Entrepreneurs :

Société Flickwir et Bush.

Directeur : M. Frank M. Talbot.

Administrateur : M. C. W. Ritner.

16. — Ces transporteurs avaient un appui au milieu ; leur portée était ainsi réduite à 460^m : chaque câble porteur avait 57^{mm}, portait couramment 7^T et jusqu'à 10^T. Grâce à l'outillage, on n'employa à ce grand ouvrage que 225 hommes.

SOURCES :

S_1. — Engineering Record. 3 mai 1913, p. 482 et 484 — 29 novembre 1913, p. 594 — 10 juillet 1915, p. 42.

S_2. — Dessins S_2', renseignements S_2'' et photographies S_2''' gracieusement communiqués par M. G. J. Ray, Ingénieur en Chef de la Delaware, Lackawanna and Western R. R. Cy, à Hoboken (N. J.).

VOÛTES ARTICULÉES — ARTICULATIONS ROULANTES
ARCS TRÈS SURBAISSÉS

PONTS A PLUSIEURS GRANDES ARCHES SOUS CHEMIN DE FER A VOIE NORMALE

SÉRIE A^{n} F^{r} ($\geqslant 40^{m}$)

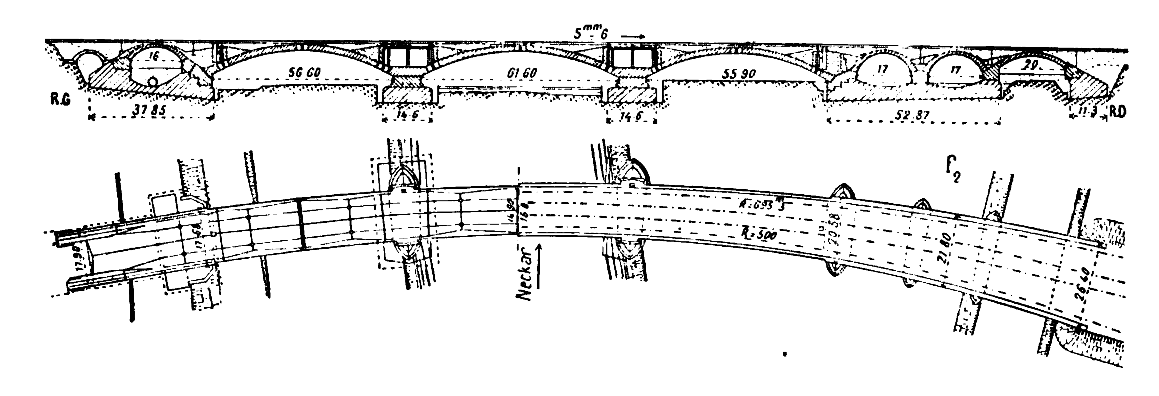
(Voir pour les A^{n} r^{te} ($\geqslant 40^{m}$) tableau synoptique IV. p. 172 et monographies IV. p. 175 à 208)

PONT A 4 VOIES SUR LE NECKAR, A CANNSTATT *(WURTEMBERG)*[1]

Lignes de Ludwigsburg-Stuttgart et Stuttgart-Plochingen

1911-1914 A^{n} F^{r} ($\geqslant 40^{m}$)[1]

f_1 — Ensemble — $0^{mm}44$



1. Tracé des têtes. — Le pont porte 4 voies en courbe : elles ne sont pas parallèles ; celle de droite a un rayon de 500^{m}.

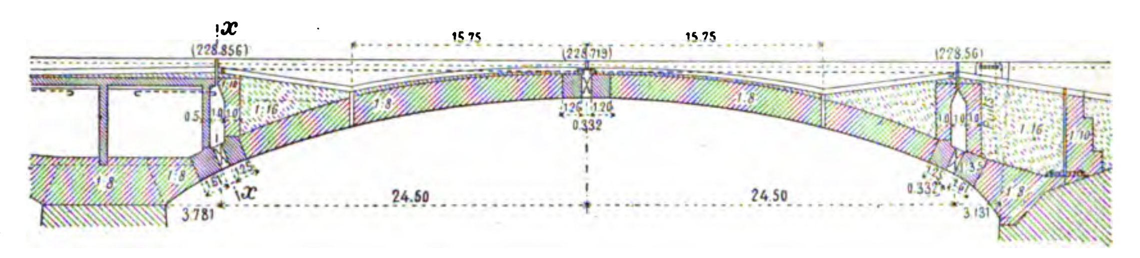
Les têtes sont ainsi tracées :

Côté concave. — Bandeaux suivant un cylindre vertical de rayon un peu moindre que le parapet : tympan en fruit variant de 0 à la clef à 1/24 aux retombées.

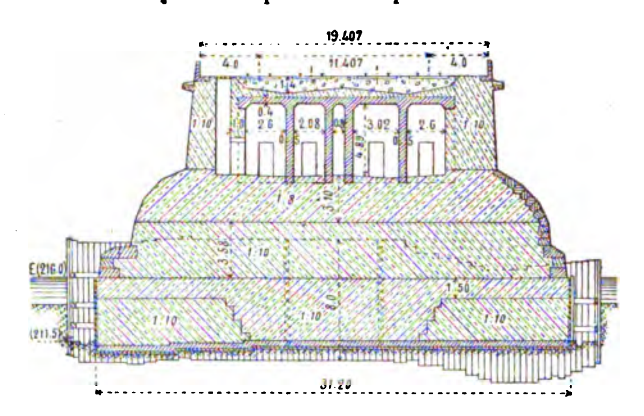
Côté convexe. — Courbes d'intrados de chaque voûte dans des plans verticaux se coupant sur l'axe des piles : bandeaux en fruit augmentant de 0 à la clef à 1/10,6 aux retombées.

1. — Voir tableau synoptique VI, p. 190.

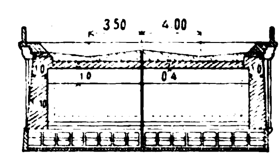
f_3 — Coupe en long de l'arche rive droite — 2mm



f_4 — Coupe sur une pile — 2mm



f_5 — Coupe sur xx de f_3 — 2mm



2. Efforts par $\overline{0^m01}^2$. dans la voûte centrale

(Côté concave)

		Retombée R. G.		1/4 de la portée R. G.		Clef	
		Intrados	Extrados	Intrados	Extrados	Intrados	Extrados
Sous le poids propre		+ 36k3	+ 19k9	+ 30k9	+ 20k1	+ 40k3	+ 21k1
Sous la surcharge	Effort maximum	+ 8.8	+ 4.9	+ 18.2	+ 24	+ 10.3	+ 5.4
	— minimum			— 14.2	— 14.4		
Ensemble	Effort maximum	+ 45.1	+ 24.8	+ 49.1	+ 44.1	+ **50.6**	+ 26.5
	— minimum	»	»	+ 16.7	+ 5.7	»	»

3. Matériaux. — L'avant-bec des piles est revêtu de pierres pour résister aux glaces et aux crues : le reste est en béton[2].

Voici, pour les différentes parties du pont, les dosages prescrits, le travail permis, la résistance exigée.

		Dosage pour 1 vol. de ciment				Travail permis	Résistance exigée à 28 jours	
		Sable	Gravier	Pierre cassée	Ensemble	kg / $\overline{0^m01}^2$	kg / $\overline{0^m01}^2$	
Béton de fondation	Piles en rivière				10	8^k	56^k	coeff. de sécurité 7
	Autres appuis (pour une partie, on a ajouté 1/5 de pierres)				14	12	84	
Béton en élévation	Piles hors de la rivière et culées				12	18	126	
	Tympans et piles en rivière				10	20	140	
	Remplissage au-dessus des piles				16			
Béton armé	Petites voûtes	1, 5	2	3 Muschel-kalk (15^{mm} à 25^{mm})	6, 5			
	Cloisons au-dessus des v^tes				4			
	Parapets							
Béton	**G^des voûtes non armées**	**2**	**3, 5**	**2, 5** id. (25^{mm} à 45^{mm})	**8**	**50**	**250**	coeff. de séc. 5
	Sommiers d'articulation	2 (Sable du Rhin)		2 Porphyre cassé (7^{mm} à 25^{mm})	4	75 (à leur surface de contact avec les rotules)	375	

Sur 10^{cm}, le béton des parements est à 1 : 3 1/2 — jaunâtre, piqué de points noirs.

On a différencié les diverses parties des tympans par la façon de la surface. Le béton maigre des tympans et des pilastres est grossièrement travaillé à la

2. — Dans le Génie Civil du 5 octobre 1912, M. F. Mencl, Ingénieur en Chef de la Ville de Prague, a rendu compte de la construction (1910-12) du pont en béton de l'île Stvanice sur la Moldau à Prague : il traverse le grand bras par 3 arches en béton, — 36^m — 39^m — 36^m, articuiées sur plaques de plomb de 10^{mm}, occupant les 4/15 du joint * entre 2 sommiers de granit, — épaisses à la clef de 0^m75, aux naissances de 0^m90, aux joints de rupture de 1^m05 — biaises à 69° — larges entre têtes de 15^m90 — exécutées en 3 anneaux accolés de 4^m95 — 6^m — 4^m95 de largeur : chaque anneau (6 tranches) a été fait en 4 ou 5 jours. Le béton des voûtes, à 1 de ciment pour 4 de sable et granit cassé, résistait à 28 jours de 505^k à 617^k — Au décintrement (Appareils Zuffer), ** les voûtes de rive ont tassé de 1^{mm} à 4^{mm}, la voûte centrale de 6^{mm} à 10^{mm}.
On a éprouvé les voûtes *** : la grande, sous une charge de 337^T, a fléchi de $1^{mm}5$.
Prix du pont : 350 fr. par mq.

* IV p. 8 à 10, 35 à 48, 89 à 99. ** II p. 166, 192. *** V. p. 179.

grosse pointe : les bandeaux des grandes voûtes, en béton gras, en saillie de 10^{cm} sur les tympans, sont smillés; les pilastres, consoles, parapets, sont à taille fine.

4. Sommiers en béton des rotules. — L'ensemble des sommiers cube 750^{mc}. En les armant à 1 1/2 pour °/₀, on y eût employé 110^T de fer.

Au laboratoire d'essai des matériaux de Stuttgart, on a essayé, à 28 jours, des échantillons au 1/3, au 1/4, au 1/5 de la dimension des sommiers, armés à 0 °/₀, — 0,33 °/₀, — 0,58 °/₀ — au dosage de 1 volume de ciment, 1 1/2 de sable du Rhin, 2 de porphyre cassé. Le béton a résisté :

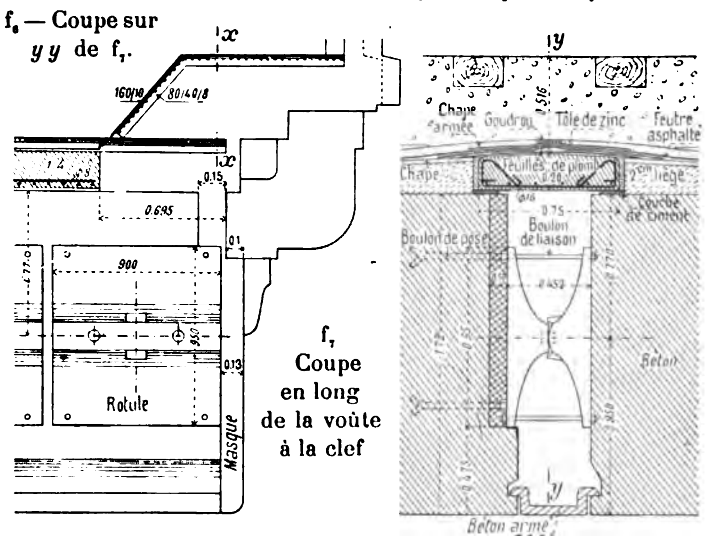
	Béton non armé	Béton armé
au 1/3 de la grandeur des sommiers, à	483^k	532^k
au 1/5 id. à	575	633

On n'a pas armé.

5. Joint de dilatation. — Au-dessus des articulations, les tympans sont coupés jusqu'au parapet par un joint de 2^{cm}, garni de plaques de liège. Il se voit sur les bandeaux et la plinthe : sur les tympans, il est masqué par un petit pilastre.

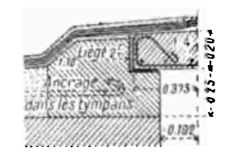
Rotule de clef et masque du joint de dilatation $2^{cm}5$

f_6 — Coupe sur yy de f_7.

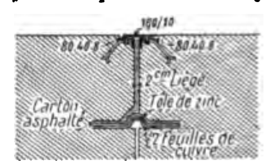


f_7 Coupe en long de la voûte à la clef

f_8 — Appui de la plaque de recouvrement à la clef des arches de rive.



f_9 — Coupe sur xx de f_8.



Pour empêcher des fissures irrégulières dans le béton par suite du retrait ou du froid, on a coupé par un joint sec les tympans au-dessus des piles : on les a armés en haut.

Les parapets ont, tous les 3^m, un joint à rainure et languette : un sur 2, un sur 3 de ces joints traverse les consoles.

Les rotules sont masquées aux têtes par des plaques de béton armé de 0^m13.

6. Chape. — L'extrados, les faces intérieures des tympans, sont recouverts d'un enduit lissé de mortier de ciment à 1/3 : dessus, sont collées, par du goudron à chaud, des plaques de feutre asphalté de 9^{mm}.

7. Cintres. — On les a calculés pour le poids de la voûte (sans le majorer pour tenir compte du pilonnage), 4580^k par m. q. pour la voûte en rivière.

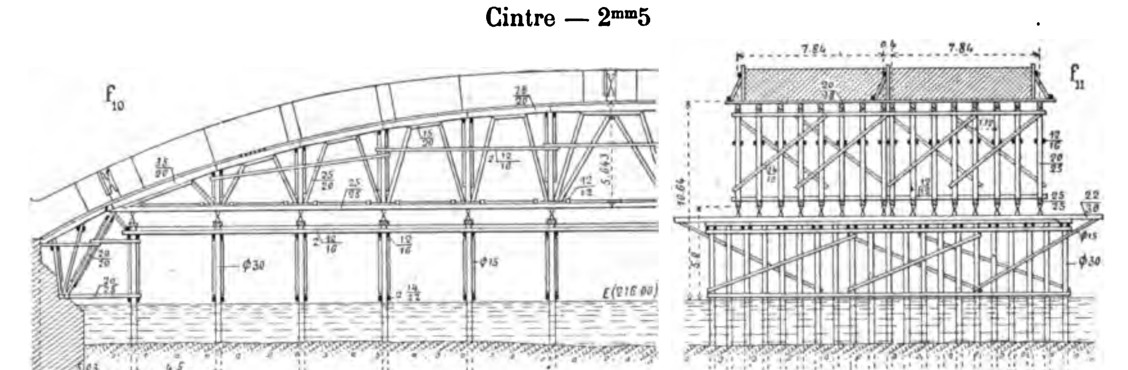
Les efforts permis étaient par $\overline{0^m01}^2$:

	Chêne Hêtre	Pin Sapin
Flexion (tension et compression suivant les fibres)........	75^k	55^k
Compression normale aux fibres [3]	20	15

Pour tenir compte du flambement, l'effort en kg $/\overline{0^m01}^2$ des pièces chargées de bout (montants, pieux) était calculé par la formule :

$$\frac{\beta \text{ (Effort permis à la compression)}}{1 + 0{,}0002 \dfrac{l^2 \text{ (longueur libre)}}{r^2 \text{ (rayon de gyration)}}}$$

Cintre — 2^{mm}5



Aux retombées, jusqu'aux rotules, les cintres ont la largeur des voûtes. Au cerveau, entre les rotules, ils n'en ont que la 1/2 largeur et ont été ripés transversalement. Deux plate-formes en métal étaient disposées sur la tête des pieux, l'une au-dessus de l'autre : pour riper le cintre, on le soulevait avec des vérins, on plaçait, entre les 2 plaques, des rouleaux.

En 2 jours, on souleva, on ripa de 9^m, on abaissa les cintres des 3 grandes voûtes : pour le ripage seul de chaque voûte, il fallait environ 2 heures.

8. Exécution des grandes voûtes. — Elles ont été construites en 2 anneaux : le second sur le cintre du premier ripé transversalement. Le joint longitudinal entre les 2 anneaux s'arrête aux piles.

On bétonna dans l'ordre indiqué au croquis f_{11} ; on posa les rotules après bétonnage des tranches 3 et 4.

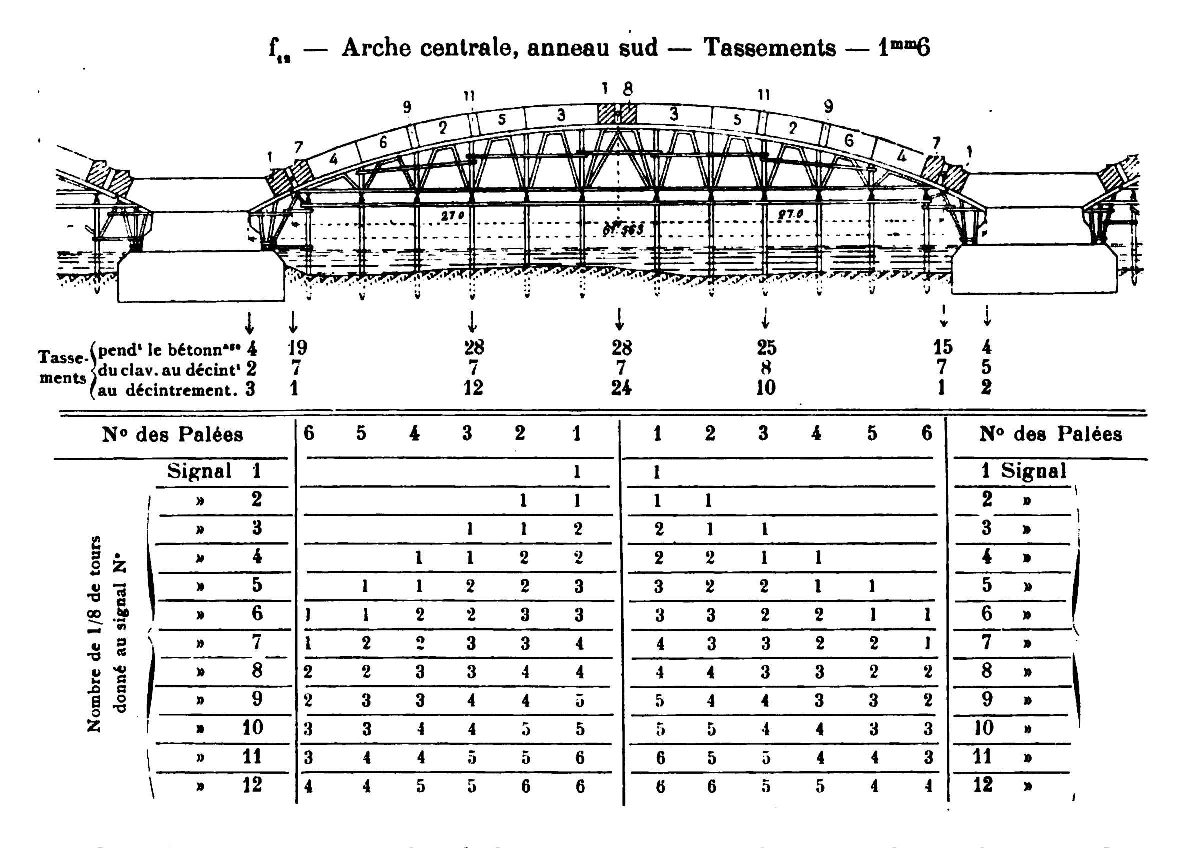
3. — V, p. 132, art. 2.

Du 30 avril au 17 juin 1913, on bétonna les retombées des 3 grandes voûtes sur toute la largeur ; le haut des 2 piles, le 1ᵉʳ anneau (en tout 4300ᵐᶜ de béton) et on posa les rotules du 1ᵉʳ anneau (117ᵀ); du 10 au 30 septembre, on bétonna le 2ᵉ anneau (2200ᵐᶜ), on posa ses rotules (117ᵀ), opération fort délicate[4].

9. Décintrement.

— On décintra les 3 grandes voûtes à la fois. Sur chaque vérin était disposé un cadran gradué par 1/8 de tour. A chaque signal, on donnait aux vérins le nombre de tours indiqué au tableau ci-après :

f_{11} — Arche centrale, anneau sud — Tassements — 1ᵐᵐ6



Nᵒ des Palées	6	5	4	3	2	1	1	2	3	4	5	6	Nᵒ des Palées
Signal 1						1	1						1 Signal
» 2					1	1	1	1					2 »
» 3				1	1	2	2	1	1				3 »
» 4			1	1	2	2	2	2	1	1			4 »
» 5		1	1	2	2	3	3	2	2	1	1		5 »
» 6	1	1	2	2	3	3	3	3	2	2	1	1	6 »
» 7	1	2	2	3	3	4	4	3	3	2	2	1	7 »
» 8	2	2	3	3	4	4	4	4	3	3	2	2	8 »
» 9	2	3	3	4	4	5	5	4	4	3	3	2	9 »
» 10	3	3	4	4	5	5	5	5	4	4	3	3	10 »
» 11	3	4	4	5	5	6	6	5	5	4	4	3	11 »
» 12	4	4	5	5	6	6	6	6	5	5	4	4	12 »

(Signaux 2 à 12 : Nombre de 1/8 de tours donné au signal Nᵒ)

Sous les 8 palées centrales de la voûte en rivière, la course des vérins était de 16ᵐᵐ, ailleurs de 13ᵐᵐ. On commençait à abaisser les retombées, quand la clef était descendue de son tassement calculé.

Il y avait, pour les 3 cintres, 291 vérins — à chaque vérin, 1 homme — à chaque palée, 2 surveillants pour observer les signaux : en tout, 363 hommes.

Le décintrement fut fait en 1 h. 1/2.

Pendant le décintrement des deuxièmes anneaux, le premier de la voûte en rivière tassa encore de 0ᵐᵐ4. Elle a tassé sensiblement plus que les voûtes de rive : les piles en rivière se sont probablement inclinées vers les rives.

4. — Elle est détaillée S₁ p. 211 — On a opéré comme au pont de la Wallstrasse à Ulm IV, p. 149 — Voir aussi IV, p. 134 à 136, pont de Grasdorf.

10. Personnel.

Directeur des Chemins de fer de l'État de Wurtemberg.

Architecture : M. Mayer de Stuttgart, « Baurat ».

Entrepreneurs : MM. Dyckerhoff et Widmann — à la suite d'un concours ouvert entre 6 grandes entreprises[5].

5. — On en trouvera un compte rendu dans le « Beton und Eisen » 1912 cahiers 6, 7, 8.

SOURCE :

S_1. — Schweizerische Bauzeitung, 1914 — 10, 17, 24, 31 Octobre — 7 Novembre.
« Vom Bau der viergeleisigen Eisenbahnbrücke über den Neckar bei Cannstatt » von W. Siegerist, Oberingenieur der Firma Dyckerhoff und Widmann A. G., Zweigniederlassung Dresden.

TABLE DES MATIÈRES

DU TOME VI

1RE PARTIE — INSTRUCTIONS POUR PROJETER ET CONSTRUIRE

LIVRE I — OUVRAGES DE 8m D'OUVERTURE ET AU-DESSOUS

TITRE I. — PROJETS D'EXÉCUTION

CHAPITRE I. — DÉBOUCHÉS

TITRE I. — PROJETS D'EXÉCUTION *(Suite)*

TITRE I. — PROJETS D'EXÉCUTION *(Suite)*

CHAPITRE IX. — ABORDS

TITRE II. — DESSINS — TABLEAUX

CHAPITRE I. — OUVRAGES SOUS RAILS EN PLEIN CINTRE

TITRE II. — DESSINS. — TABLEAUX *(Suite)*

LIVRE II. — VIADUCS SOUS CHEMIN DE FER A VOIE NORMALE A ARCHES ÉGALES EN PLEIN CINTRE A UN SEUL ÉTAGE

TITRE I. — VIADUCS EN ALIGNEMENT DROIT ET EN PALIER

CHAPITRE I. — CONDITIONS IMPOSÉES PAR LA CIRCULATION DES TRAINS ET PAR CELLE DES AGENTS

TITRE I. — VIADUCS EN ALIGNEMENT DROIT ET EN PALIER *(Suite)*

TITRE I. — VIADUCS EN ALIGNEMENT DROIT ET EN PALIER (*Suite*)

CHAPITRE VI. — PILES

CHAPITRE VII. — TYMPANS

TITRE I. — VIADUCS EN ALIGNEMENT DROIT ET EN PALIER *(Suite)*

TITRE I. — VIADUCS EN ALIGNEMENT DROIT ET EN PALIER *(Suite)*

TITRE II. — DISPOSITIONS SPÉCIALES AUX VIADUCS EN COURBE

CHAPITRE I. — VOÛTES EN BERCEAU. — TRACÉ DES TYMPANS

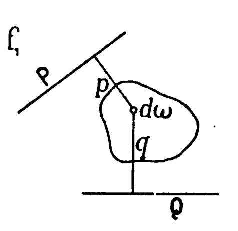
CHAPITRE II. — VOÛTES NON EN BERCEAU AVEC GÉNÉRATRICES DES NAISSANCES CONVERGEANT AU CENTRE DE LA COURBE DU TRACÉ

LIVRE II. — COMMENT ON CALCULE UNE VOÛTE

ARC ÉLASTIQUE INARTICULÉ SUR APPUIS IMMOBILES

MÉTHODE CULMANN-RITTER

TITRE I. — PRÉAMBULE



MOMENTS DU SECOND DEGRÉ D'UNE SURFACE Ω PAR RAPPORT : A UNE DROITE P ($\Sigma p^2 d\omega$, moment d'inertie) A DEUX DROITES P,Q ($\Sigma pq d\omega$, moment centrifuge, f_1)

CHAPITRE I. — MOMENTS PAR RAPPORT A DEUX AXES PASSANT PAR LE CENTRE DE GRAVITÉ

CHAPITRE II. — MOMENTS PAR RAPPORT A DES AXES P, Q NE PASSANT PAS PAR LE CENTRE DE GRAVITÉ

TITRE II. — COMMENT, EN PRINCIPE, ON DÉTERMINE LES RÉACTIONS DES APPUIS DUES A UNE FORCE P MÉTHODE, FORMULES

CHAP. I. — MOUVEMENTS, SOUS L'ACTION D'UNE FORCE P, D'UN POINT J (X, Y) INVARIABLEMENT LIÉ A UNE RETOMBÉE B, SUPPOSÉE LIBRE, D'UN ARC ÉLASTIQUE DONT L'AUTRE RETOMBÉE A DEMEURE IMMOBILE

CHAPITRE II. — COMMENT, DES DÉPLACEMENTS VIRTUELS $\mathcal{D}X$, $\mathcal{D}Y$, $\mathcal{D}\theta$ DU CENTRE ÉLASTIQUE DUS A UNE FORCE P, ON DÉDUIT LA RÉACTION DE L'APPUI R^B QUI LES ANNULE

TITRE III. — ARC DISSYMÉTRIQUE COMMENT, EN PRATIQUE, ON CONSTRUIT LES RÉACTIONS DES APPUIS

CHAPITRE I. — MOMENTS STATIQUES, MOMENTS D'INERTIE, MOMENTS CENTRIFUGES DES POIDS ÉLASTIQUES. FUNICULAIRES 1 A 5

CHAPITRE II. — COMMENT A L'AIDE DES FUNICULAIRES 1 A 5 ON CONSTRUIT LES RÉACTIONS DES APPUIS DUES A DES FORCES VERTICALES

TITRE III. — ARC DISSYMÉTRIQUE *(Suite)*

TITRE IV. — ARC SYMÉTRIQUE
EFFORTS DANS LA VOÛTE DU PONT ANTOINETTE

TITRE IV. — ARC SYMÉTRIQUE *(Suite)*

CHAPITRE II. — TRAVAIL PAR $\overline{0^m01^2}$ SOUS LE POIDS MORT

CHAPITRE III. — EFFORTS PAR $\overline{0^m01^2}$ DUS AUX SURCHARGES ROULANTES

TITRE IV. — ARC SYMÉTRIQUE (*Suite*)

TITRE V. — VÉRIFICATION GROSSIÈRE DES ÉPURES D'UNE VOÛTE

Comparaison avec celles faites pour une voûte dont la fibre moyenne est une parabole ADSB de même portée L et même montée *b*, et pour laquelle le moment d'inertie I d'une section MM inclinée de α sur la verticale

$$= \frac{I_0 \binom{\text{moment}}{\text{à la clef}}}{\cos \alpha} = I_0 \frac{ds}{dx}$$

TITRE V. — VÉRIFICATION GROSSIÈRE DES ÉPURES D'UNE VOÛTE *(Suite)*

TABLES NUMÉRIQUES *(Suite)*

FRUIT MINIMUM φ A DONNER AU TYMPAN CONVEXE
DES PONTS OU VIADUCS EN COURBE DE RAYON **R**
POUR QU'AUCUN POINT DE L'INTRADOS DU BANDEAU
NE SOIT EN PORTE-A-FAUX
PAR RAPPORT A UN POINT PLUS BAS : MIN $\varphi = \frac{r}{R}$

DÉVELOPPEMENT L D'UNE ELLIPSE DE SURBAISSEMENT σ

CALCUL D'UN CINTRE

ANNEXES

PONTS A VOÛTES INARTICULÉES OU ARTICULÉES DE 40^m ET PLUS DE PORTÉE ACHEVÉS APRÈS 1912 TABLEAUX SYNOPTIQUES. — MONOGRAPHIES

VOÛTES INARTICULÉES EN PLEIN CINTRE C

PONTS A UNE SEULE GRANDE ARCHE SOUS CHEMIN DE FER A VOIE NORMALE

SÉRIE $C^1 F^r$ ($\geqslant 40^m$)

VOÛTES INARTICULÉES EN PLEIN CINTRE C *(Suite)*

PONTS A UNE SEULE GRANDE ARCHE
SOUS CHEMIN DE FER A VOIE ÉTROITE

SÉRIE $C^1 f^r$ ($\geqslant 40^m$)

VOÛTES INARTICULÉES EN ELLIPSE E

PONTS EN DEUX ANNEAUX
A PLUSIEURS GRANDES ARCHES SOUS ROUTE

SÉRIE $E^n E^n r^{te}$ ($\geqslant 40^m$)

PONTS A PLUSIEURS GRANDES ARCHES
SOUS CHEMIN DE FER A VOIE NORMALE

SÉRIE $E^n F^r$ ($\geqslant 40^m$)

VOÛTES INARTICULÉES EN ARC PEU SURBAISSÉ Â

PONTS A UNE SEULE GRANDE ARCHE SOUS CHEMIN DE FER A VOIE NORMALE

SÉRIE Â^1 F^r ($\geqslant 40^m$)

PONTS A UNE SEULE GRANDE ARCHE SOUS CHEMIN DE FER A VOIE ÉTROITE

SÉRIE Â^1 f^r ($\geqslant 40^m$)

VOÛTES INARTICULÉES EN ARC ASSEZ SURBAISSÉ Â

PONTS EN DEUX ANNEAUX A UNE SEULE GRANDE ARCHE SOUS ROUTE

SÉRIE Â^1 Â^1 r^{te} ($\geqslant 40^m$)

VOÛTES INARTICULÉES EN ARC ASSEZ SURBAISSÉ Â

(Suite)

PONTS A UNE SEULE GRANDE ARCHE SOUS CHEMIN DE FER A VOIE NORMALE

SÉRIE Â¹ Fʳ (⩾ 40ᵐ)

VOÛTES INARTICULÉES ⩾ 40ᵐ EN BÉTON PEU ARMÉ

VOÛTES ARTICULÉES
ARTICULATIONS ROULANTES
ARCS TRÈS SURBAISSÉS Â

PONTS A PLUSIEURS GRANDES ARCHES
SOUS CHEMIN DE FER A VOIE NORMALE

SÉRIE $Â^n$ F^r (⩾ 40m)

TABLE ABRÉGÉE DES MATIÈRES

TOMES I, II, III, IV, V

TOME I

(TABLE DÉTAILLÉE — TOME I, p. 248)

TOME II

(TABLE DÉTAILLÉE — TOME II, p. 210)

VOÛTES INARTICULÉES EN ARC PEU SURBAISSÉ Â

PONTS A UNE SEULE GRANDE ARCHE SOUS ROUTE

SÉRIE $Â^1$ r^{te} $(\geqslant 40^m)$

N^{os} d'ordre dans la série $Â^1$ r^{te} $(\geqslant 40^m)$

PONTS EN DEUX ANNEAUX
A UNE SEULE GRANDE ARCHE SOUS ROUTE

SÉRIE $Â^1$ $Â^1$ r^{te} $(\geqslant 40^m)$

PONTS A UNE SEULE GRANDE ARCHE
SOUS CHEMIN DE FER A VOIE NORMALE

SÉRIE $Â^1$ F^r $(\geqslant 40^m)$

N^{os} d'ordre dans la série $Â^1$ F^r $(\geqslant 40^m)$

PONTS A UNE SEULE GRANDE ARCHE
SOUS CHEMIN DE FER A VOIE ÉTROITE
SÉRIE $\hat{A}^1$ f^r ($\geqslant 40^m$)

TOME III

(TABLE DÉTAILLÉE — TOME III, p. 396)

VOÛTES INARTICULÉES EN ARC ASSEZ SURBAISSÉ $\hat{A}$

PONTS A UNE SEULE GRANDE ARCHE SOUS ROUTE
SÉRIE $\hat{A}^1$ r^{te} ($\geqslant 40^m$)

Nos d'ordre dans la série $\hat{A}^1$ r^{te} ($\geqslant 40^m$)

PONTS A UNE SEULE GRANDE ARCHE
SOUS CONDUITE D'EAU (AQUEDUCS)

SÉRIE $\hat{A}^1$ aq ($\geqslant 40^m$)

PONTS A UNE SEULE GRANDE ARCHE
SOUS CHEMIN DE FER A VOIE NORMALE

SÉRIE $\hat{A}^1$ F^r ($\geqslant 40^m$)

Nos d'ordre dans la série $\hat{A}^1$ F^r ($\geqslant 40^m$)

PONTS A PLUSIEURS GRANDES ARCHES SOUS ROUTE

SÉRIE $\hat{A}^n$ r^{te} ($\geqslant 40^m$)

PONTS A PLUSIEURS GRANDES ARCHES
SOUS CHEMIN DE FER A VOIE NORMALE

SÉRIE $\hat{A}^n$ F^r ($\geqslant 40^m$)

VOÛTES INARTICULÉES EN ARC TRÈS SURBAISSÉ Â

PONTS A UNE SEULE GRANDE ARCHE SOUS ROUTE

SÉRIE Â¹ r^te (⩾ 40m)

PONTS A UNE SEULE GRANDE ARCHE SOUS CONDUITE D'EAU (AQUEDUCS)

SÉRIE Â¹ aq (⩾ 40m)

PONTS A UNE SEULE GRANDE ARCHE SOUS CHEMIN DE FER A VOIE NORMALE

SÉRIE Â¹ F^r (⩾ 40m)

PONTS A PLUSIEURS GRANDES ARCHES SOUS ROUTE

SÉRIE Âⁿ r^te (⩾ 40m)

QUELQUES VOÛTES INARTICULÉES

QU'ON AURAIT, A TORT, CHERCHÉES AU LIVRE I

TITRE I. — VOÛTES INARTICULÉES ≥ 40m EN BÉTON PEU ARMÉ

TITRE II. — VOÛTES INARTICULÉES ≥ 40m TOMBÉES PENDANT QU'ON LES CONSTRUISAIT

TITRE III. — VOÛTES INARTICULÉES AUXQUELLES ON A ATTRIBUÉ A TORT 40m DE PORTÉE OU PLUS

III. A. — PONTS QUI EXISTENT MAIS QUI N'ONT PAS 40m

III. B. — PONTS RUINÉS

III. C. — PONTS QUI N'ONT JAMAIS EXISTÉ

LIVRE II. — CE QUE L'EXPÉRIENCE ENSEIGNE DE SPÉCIAL AUX VOÛTES INARTICULÉES

TITRE I. — COMMENT ON TRACE UNE VOÛTE

ANNEXE

ÉPAISSEUR A LA CLEF DES VOÛTES INARTICULÉES

TOME IV

(TABLE DÉTAILLÉE. — TOME IV, p. 287)

2e PARTIE. — VOÛTES ARTICULÉES

LIVRE II. — DESCRIPTION DES PONTS QUI ONT OU AVAIENT DES VOÛTES ARTICULÉES DE 40m ET PLUS DE PORTÉE. — TABLEAUX SYNOPTIQUES. — MONOGRAPHIES.

Pages Tome IV — Texte / Table détaillée

1°. — VOÛTES SEMI-ARTICULÉES

ARTICULATIONS SUR PLOMB

ARCS TRÈS SURBAISSÉS

PONTS A UNE SEULE GRANDE ARCHE SOUS ROUTE

SÉRIE A^1 r^{te} (⩾ 40m)

ARTICULATIONS A GENOU

ARCS TRÈS SURBAISSÉS

PONTS A UNE SEULE GRANDE ARCHE SOUS ROUTE

SÉRIE A^1 r^{te} (⩾ 40m)

PONTS A UNE SEULE GRANDE ARCHE SOUS CHEMIN DE FER A VOIE NORMALE

SÉRIE A^1 F^r (⩾ 40m)

PONTS A PLUSIEURS GRANDES ARCHES SOUS ROUTE

SÉRIE A^n r^{te} (⩾ 40m)

2°. — VOÛTES ARTICULÉES *(DE FAÇON PERMANENTE)*

ARTICULATIONS SUR PLOMB

ELLIPSES

PONTS A PLUSIEURS GRANDES ARCHES SOUS CHEMIN DE FER A VOIE NORMALE

SÉRIE E^n F^r (⩾ 40m)

TOME V

(TABLE DÉTAILLÉE. — TOME V, p. 213)

3e PARTIE

CE QUE L'EXPÉRIENCE ENSEIGNE DE COMMUN A TOUTES LES VOÛTES

LIVRE II. — COMMENT ON EXÉCUTE UN PONT EN MAÇONNERIE. — FONDATIONS. — CINTRES — VOÛTES

PONTS DÉCRITS DANS L'OUVRAGE

INDEX ALPHABÉTIQUE

(Ceux à voûtes de portée de 40^m et plus, en maçonnerie ou en béton non armé, ont un symbole).

Pour le sens des symboles, voir Tomes I, II, III, p. 3 et 4. Le trait horizontal sous la lettre de l'intrados désigne les voûtes articulées : les petites lignes coupant ce trait désignent le type d'articulation (Tome IV, p. 28 et 29).

ERRATA GÉNÉRAL

On avait d'abord pensé ne faire que 5 Tomes : on a dû en faire 6. Au cours des Tomes I à IV, on a quelquefois renvoyé à un Appendice, Tome V : il est dans le Tome VI.

TOME I

Pages		Au lieu de :	lire :	Pages		Au lieu de :	lire :
26	4e ligne............	Ça	Ç'a	174	Dessin f_1 - Numéros des voûtes.......	1, 2, 3, 4	4, 3, 2, 1
82	Renvoi 1..........	1908 à 1901	1908 à 1910	175	Dessin f_{10} - Echelle.	10^{cm}	5^{cm}
86	P^{t} de Vizille, col. 4.	3 centres	5 centres	188	P^{t} des Amidonniers, col. 9 - Evidemen^{ts} - Surbaissements.	9^m90 1/4,91, 1/4,97	10^m10 1/4,07, 1/4,04
90	P^{t} d'Edmondson, col. 4. Montée...	13^m309	13^m35	194	3e ligne............	la Dalbabe,	la Dalbade,
91	P^{t} d'Edmondson, col. 15...........	14 tranches	16 tranches	194	2. Forme des voûtes - Rayons de courbure aux naiss^{ces}..	$: \rho_1 = \frac{p^2}{R}$	$: \rho_1 = \frac{p^2}{a}$
129	P^{t} de Signac, col. 16, Décintrement....	68 jours	30 jours	245 250	P^{t} de Ballochmyle...	*Angleterre, Ecosse*	*G^{de}.Bretagne, Ecosse*
142	P^{t} de Valence, col. 9.	sur murs de 0^m95	sur murs de 0^m55				
157	10e ligne...........	avec l'intrados	avec l'extrados				
173	Renvoi 1...........	$y = \frac{ix^2}{l^2}\left(1 - \frac{x}{l}\right)$	$y = \frac{ix^2}{l^2}\left(1 - \frac{x}{2l}\right)$				

TOME II

Pages		Au lieu de :	lire :	Pages		Au lieu de :	lire :
49	7. Décintrement, dernière ligne....	à 16^m35	à 16^m53	122	P^{t} d'Escot, col. 12, Ecart^{nt} des fermes.	1^m50	1^m23
68	Dessin f_{41}..........	$e_1 = 2^m10$	$e_1 = 2^m16$	178	P^{t} de Ramounails, col. 9, dern^{re} ligne.	piles de 0^m90	piles de 0^m80
120	P^{t} de Palmgraben, col. 16. Décintr^{nt}.	20 août	20 juillet	181	P^{t} de Tuoi, col. 15.	3 rouleaux	2 rouleaux

TOME III

Pages		Au lieu de :	lire :	Pages		Au lieu de :	lire :
16	P^{t} de Montanges, colonne 1........	1908-1909	1908-1910	332	Renvoi 19, 3e ligne..	$(Chx) = \frac{ex + e^{-x}}{2}$	$(Chx) = \frac{e^x + e^{-x}}{2}$
114	3. Chape. 1re ligne..	d'asphalte recouverte	d'asphalte recouvert	334	9e ligne............	courbure diminue	courbure augmente
124	1re ligne...........	Tlinthe	Plinthe	360	Dernière ligne......	(sur 3 fois la bande comprimée)	(sur la bande comprimée)
124	Renvoi 5...........	« Im Einklang.. »	« Im Einklange.. »	373	Renvoi 24, 2e ligne..	(..§ II, art. 2.)	(..§ 2, art. 4).
130	Titre, 3e ligne.......	1902	1901-1902	374	Renvoi 27, 5e ligne..	(§ II, art. 2-D)	(§ 2, art. 4),
167	Renvoi 4...........	$(\geqslant 40^m)^{11}$	$(\geqslant 40^m)^{12}$	386	P^{t} de l'Alma, 3e col.	43^m38,	43^m.
287	P^{t} d'Elsen, col. 12, Ecart^{nt} des fermes.	0^m88	1^m08	387	P^{t} de Lichtensteig, 11e colonne......	1910-1912,	1907-1909,
330	4e ligne............	y croit	y décroit	390	P^{t} de Gignac, 3e col.	48^m73,	48^m42,

TOME IV

Pages		Au lieu de :	lire :	Pages		Au lieu de :	lire :
12	Art. 3, 1re ligne....	Köpcke (f_{11})	Köpcke$^{18, 19}$ (f_{11})	223	P^{t} Max-Joseph, col. 12 — Nombre de fermes...........	9	10
15	Tableau II_A - Valeurs de $\frac{2x}{l}$...........	0,046, 0,041, 0,049, 0,10, 0,12, 0,12, 0,29, 0,29, 0,30	0,070, 0,062, 0,073 0,152, 0,183, 0,179, 0,39, 0,43, 0,45	260	Tableau — Avant-dernière col......	Epaiss^{r} en 0^m01	Epaiss^{r} en 0^m001
24	Renvoi 48, 5e ligne..	triangles 00'' C	triangles 00''0'	267	P^{t} de Grasdorf, 1re colonne..........	1^v, 2^v5, 4^v5	1^v, 2^v5, 4^v
46	6. Exécution de la voûte, 6e ligne...	tassa de 55^{mm},	tassa de 72^{mm},	272	Renvoi 1...........	p. 45.	p. 55.
143	Titre, 1re ligne......	(*Bavière*)	(*Wurtemberg*)	276	Renvoi 6 - P^{t} de Moulins-lez-Metz, 3e colonne.......	Bandeaux en PT	Bandeaux en MEV
156, 159, 247 264, 284, 295	Pont d'Illerbeuren	classé comme très surbaissé A	est assez surbaissé A	285	P^{t} Cornélius, 4e col..	$(\geqslant 40^m)^2$	$(\geqslant 40^m)^3$
168	P^{t} de Neckargartach, col. 3...........	Fruit : 1/40	Fruit : 1/10	285	P^{t} de Neckarhausen, 2e colonne.......	Danube	Neckar
221	P^{t} d'Inzigkofen, col. 10. Rive dr^{te}. Pression.........	28^k6	7^k7	294	P^{t} Elise, 1re ligne...	$(\leqslant 40^m)^4$	$(\geqslant 40^m)^4$

TOME V

Pages		Au lieu de :	Lire :
27	Renvoi 39..........	Art. 7. — A.	Art. 8.
34	Photographie.......	Φ_5 - amont	Φ_5 - aval
34	id.	Φ_6 - aval	Φ_6 - amont
38	Renvoi 41. 5e ligne..	10 jours	100 jours
52	Pt de Lichtensteig. 4e colonne.......	Allemagne	Suisse
52	Pt de Krummenau. 4e colonne.......	Allemagne	Suisse
61	Pt d'Edmondson. 4e colonne.......	I - 206	I - 122
70	Croquis des 2e, 3e, 4e colonne..........	l_a, l_v, l_a à l'extrados	l_a, l_v, l_a à l'intrados
75	Renvoi 10. 1re ligne.	(renvoi 4),	(renvoi 5),
77	Renvoi 17. Valeurs de r_2 et r_1.......	$E = r_2 + r_1$ $\frac{E}{2}(1 \pm \text{cotg}\,\theta)$	$CF = r_2 + r_1$ $\frac{E}{2}(\sin\theta \pm \cos\theta)$
83	Renvoi 12..........	soit 0,097	soit 0,0097
102	Dessin f_1...........	le redresser	
103	Photographie........	Pont Ælins	Pont Ælius
141	Renvoi 42..........	Nydeck (II, 33);	Nydeck (II, 53);
153	Renvoi 101.........	Teinach (IV, 204);	Teinach (III, 204);
154	Renvoi 122. Pt de Krenngraben.....	(III, 87, 136);	(II, 87, 136);
160	Renvoi 10. Pt de Céret	(I - 118),	(I - 18),
163	Renvoi 41. Pt du Prince-Régent...	(IV, 233).	(IV, 223).
163	Renvoi 44. Pt de Jaremcze..........	(III, 110).	(III, 116).
175	Art. 3. Pont de Trittenheim. Tassemt.	20mm	12 à 15mm
203	Tableau II. Plus grandes voûtes inarticulées. 4e col.	48m70 (Vérone)	55m (Annibal, Diable)
210	Art. 3. Pt d'Edmondson. Surbaissemt.	1/5,428	1/3,17

TOME VI

Pages		Au lieu de :	Lire :
13	§ 1. — Art. 2.......	même 0m50.	même 0m20.
48	Renvoi 27..........	Table T_1,	Table T_2,
64	Renvoi 69. 11e ligne.	côté Amiens	côté Rouen.
71	Renvoi 92..........	V, p. 50.	V, p. 60.
83	Art. 1. — 4e ligne..	sur 0m25	sur 0m20
159	Art. 1. — Fin de la 2e ligne..........	axe $\mathcal{G}X$.	axe $\mathcal{G}Y$.
166	§ 2. Art. 1 - 2e lig...	$Z_1^B = \frac{v^2}{4a^2}$,	$Z_1^B = \frac{v^2}{4a}$,
199	Pt sur la Roizonne..	1912-1916	1912-1915
218	Pt sur l'Orkla......	1912-1915	1911-1915
214	Renvoi 11 - 1re ligne..	d'octobre 1881,	d'octobre 1886,

POUR RELIER, CONSULTER, CONSERVER L'OUVRAGE, voir p. 283

POUR RELIER, CONSULTER, CONSERVER L'OUVRAGE

A CAUSE DES NOMBREUSES PHOTOGRAPHIES QUI Y FIGURENT, ON A DÛ, MALGRÉ QU'ON EN EÛT, EMPLOYER DU PAPIER « COUCHÉ », QUI EST FRAGILE ET DEMANDE QUELQUE SOIN POUR ÊTRE MANIÉ ET CONSERVÉ.

POUR RELIER, ON COUDRA LES CAHIERS SUR UNE BANDE DE TOILE : ON BROCHERA, PUIS ON COLLERA SUR LES COUTURES UNE SECONDE BANDE DE TOILE, OU MIEUX, DE PEAU.

ON RELIERA AVEC DE TRÈS FORTS « PLATS ».

POUR OUVRIR UN VOLUME RELIÉ, ON SE GARDERA DE LE POSER D'ABORD SUR UN PLAT : ON LE PLACERA VERTICALEMENT SUR SON DOS.

NE PAS PLIER LE PAPIER, ON LE CASSE — NI FEUILLETER AVEC UN DOIGT MOUILLÉ, ON LE TACHE.

CONSERVER LES VOLUMES EN UN LIEU SEC, A L'ABRI DU SOLEIL ET DE LA CHALEUR.

GRANDES VOÛTES

PAR

Paul SÉJOURNÉ

INGÉNIEUR EN CHEF DES PONTS ET CHAUSSÉES
INGÉNIEUR EN CHEF DU SERVICE DE LA CONSTRUCTION
DE LA COMPAGNIE PARIS-LYON-MÉDITERRANÉE
PROFESSEUR A L'ÉCOLE NATIONALE DES PONTS ET CHAUSSÉES

TOME VI — APPENDICE

PRATIQUE DES VOÛTES

1RE PARTIE

INSTRUCTIONS POUR PROJETER ET CONSTRUIRE

2ME PARTIE

CALCULS ET ÉPURES

3ME PARTIE

TABLES NUMÉRIQUES

ANNEXES

BOURGES
IMPRIMERIE Vve TARDY-PIGELET ET FILS
15, RUE JOYEUSE, 15

—

1916

POUR RELIER, CONSULTER, CONSERVER L'OUVRAGE, voir p. 283.




89078557444
B89078557444A